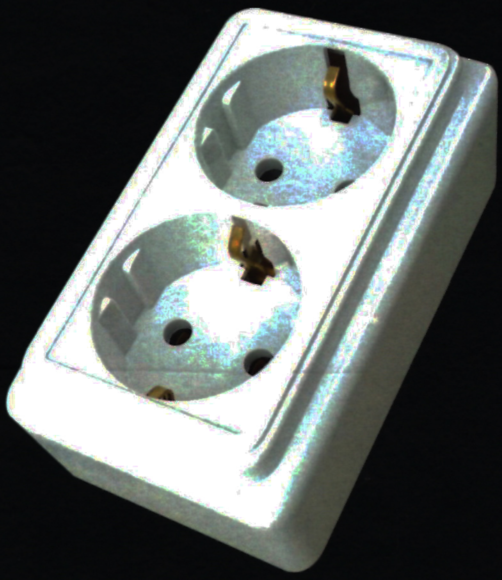
LA FISIÓN NUCLEAR

MEITNER

Uranio partido por dos, igual a energía



NATIONAL GEOGRAPHIC

LISE MEITNER aunó los roles de mujer, judía y científica, una combinación especialmente volátil en la convulsa Europa de la primera mitad del siglo XX. De origen austriaco, fue víctima tanto del desdén de sus colegas científicos varones como de la persecución racial del régimen nazi. Su colaboración de más de tres décadas con el químico alemán Otto Hahn fructificó en el descubrimiento de un nuevo elemento, el protactinio, y en la demostración de la fisión nuclear, pese a lo cual le fue negado el premio Nobel. Abogó siempre por el empleo pacífico de la energía nuclear, cuyo desarrollo se le debe en gran parte. Hoy su nombre evoca la armoniosa unión de genio investigador y de lucha contra la intolerancia y los prejuicios.

LA FISIÓN NUCLEAR

MEITNER

Uranio partido por dos, igual a energía

NATIONAL GEOGRAPHIC

ROGER CORCHO ORRIT es escritor y divulgador. Escribe sobre ciencia en medios escritos generalistas y en revistas especializadas. Es autor de diversos libros de texto y ha desarrollado parte de su carrera profesional en el mundo editorial.

Realización: EDITEC

Diseño cubierta: Llorenç Martí

Diseño interior: Luz de la Mora

Infografías: Joan Pejoan

Fotografías: Age Fotostock: 23a, 113a; Archivo de la Universidad de Leipzig: 130; Archivo RBA: 38i, 38d, 44, 49b, 61, 79, 84; Archivos Federales de Alemania: 23bd; Archivos Nacionales de Estados Unidos: 75bd, 101; Biblioteca Nacional de Medicina de Estados Unidos: 49ai; Churchill College, Camdridge: 49ad; Corbis: 123, 135b; Benjamin Couprie: 75a; Paul Ehrenfest/ Instituto Danés de Cinematografía: 75bi; Fundación Nobel: 19; Getty Images: 113b, 135a; Ferdinand Schmutzer/Museo de Historia de Berna: 125; Smithsonian Institution: 23bi; The Ultimate Science Fair Projects Resource: 47; James E. Westcott/ Museo Americano de Ciencia y Energía: 128.

ISBN: 978-84-473-7673-5
Depósito legal: B-12135-2016

Impreso y encuadernado en Rodesa, Villatuerta (Navarra)

Impreso en España - *Printed in Spain*

Sumario

Introducción

«Lise Meitner, una física que nunca perdió su humanidad»: así reza el epitafio de esta científica de origen austriaco en su tumba de Bramley, una pequeña localidad situada en Hampshire, Reino Unido. En este contexto, la palabra «humanidad» hace referencia a la innegociable escala de valores con la que condujo su vida y que le sirvió de asidero en momentos especialmente difíciles. Se trata de un epitafio que se puede entender también como un reproche dirigido a muchos de sus coetáneos, que fueron arrastrados por la ideología racista y xenófoba del nazismo. Lise conservó su respeto por todo ser humano en un momento en que, por desgracia, muchos otros lo perdieron.

Meitner fue víctima repetidamente de injusticias muy concretas e identificables. Con determinación y el apoyo de su familia, pudo superar las trabas sociales y legales que por ser mujer no le permitían estudiar y consecuentemente trabajar en lo que amaba, la investigación. Así, cuando inició su colaboración en un laboratorio químico de Berlín, no se le habilitó más que una sala en el sótano, dado que las mujeres no debían acceder al edificio. Sin embargo, estas dificultades no le impidieron seguir adelante, tal como queda atestiguado por sus importantes descubrimientos. En cambio, frente a la persecución racial a la que fue sometida por sus orígenes judíos, no tuvo más alternativa que la de huir, dejando atrás su puesto de trabajo en Berlín, sus colegas, amigos y perte-

nencias. Con ello, también perdió el tren de sus proyectos de investigación, lo que afectó a su carrera y a su prestigio profesional.

Ser mujer y de origen judío resultaron dos pesados fardos que influyeron, por ejemplo, en las deliberaciones para decidir su candidatura al premio Nobel de Química por el descubrimiento de la fisión nuclear. Injustamente, quedó descartada, mientras que su compañero de laboratorio, el químico alemán Otto Hahn, se acaparó todo el mérito, a pesar de tratarse de un logro compartido. Se pudo resarcir de esta decepción al recibir, posteriormente, la medalla Max Planck —el máximo galardón que puede recibir un físico en Alemania— y también el premio Enrico Fermi en Estados Unidos. Asimismo, asistió a la inauguración en 1959 —en Berlín, cerca del lago de Wannsee— del Instituto Hahn-Meitner para la Investigación Nuclear, auspiciado por Willy Brandt, entonces alcalde de Berlín (esta institución sigue existiendo, y su nombre actual es el de Helmholtz Zentrum Berlin). Otro reconocimiento postrero de sus importantes trabajos ha sido la instauración, desde el año 2000, del premio bianual Lise Meitner de Física Nuclear, concedido por la Sociedad Física Europea, y que reconoce los trabajos teóricos, experimentales y aplicados más destacados en esta área de estudio. No hay que olvidar el gran honor que supone para Meitner haber inspirado el nombre del elemento 109 de la tabla periódica por ser «la científica más importante del siglo», tal como argumentaron los sintetizadores de este elemento. Se trata de un elemento artificial, que se creó en 1982, y que desde 1997 se conoce como meitnerio (Mt). Es un reconocimiento que ha logrado Meitner, pero no Hahn.

Según el físico inglés James Chadwick, la alianza entre Meitner y Hahn ha sido «una de las colaboraciones más fructíferas de la historia de la ciencia». También ha sido una de las asociaciones más largas, ya que se prolongó —con intermitencias— durante tres décadas y solo el ascenso del nazismo pudo interrumpirla. Meitner era física y Hahn químico, de modo que ambos aportaron estos conocimientos y habilidades complementarios para resolver algunos de los retos que se plantearon, entre los que destacó por encima de todos ellos el problema de la fisión nuclear. Dominar los principios de la física en el caso de Meitner, así como ser un

habilidoso químico experimental como lo era Hahn, fueron aspectos cruciales para resolver este puzle que se les resistió durante años. Además de la fisión nuclear, su asociación con Hahn también destacó por lograr aislar el elemento protactinio (Pa), con un tiempo de semivida corto.

Fisión significa ruptura, escisión o división. Por fisión nuclear se entiende la escisión del núcleo atómico. Situado en el centro del átomo, el núcleo concentra casi toda su masa, y está compuesto por dos tipos de partículas: los protones, con carga eléctrica positiva, y los neutrones, que carecen de carga eléctrica. Entre los elementos constituidos por un gran número de partículas nucleares se encuentra el uranio, que se caracteriza por tener 92 protones y puede presentarse con un número diverso de neutrones; estas variaciones de un mismo elemento según el número de neutrones constituyentes del núcleo son los llamados «isótopos», en este caso del uranio. Para su denominación se explicita precisamente el número másico (suma de los protones y neutrones), de tal manera que se habla de uranio-234, uranio-235 y uranio-238.

El uranio es un elemento que a principios del siglo XX despertaba una gran curiosidad. Es muy inestable y su núcleo se descompone de forma espontánea, dando lugar a dos tipos de desintegración: la alfa (correspondiente a la emisión de una partícula formada por dos protones y dos neutrones) y la beta (que consiste en la emisión de un electrón). En la época de Meitner, el uranio era, de hecho, el elemento conocido con un mayor número atómico. No se tenía noticia de que hubiera otros elementos con un mayor número de protones, de modo que ocupaba el final de la tabla periódica.

Para muchos científicos, averiguar si efectivamente existían elementos con un número atómico mayor que el uranio tenía un gran interés. A estos hipotéticos elementos se los denominó «transuránicos». El propio Enrico Fermi realizó una serie de experimentos consistentes en bombardear este elemento con neutrones y constató que se producían lo que parecían ser elementos transuránicos y se desencadenaban una serie de reacciones difíciles de interpretar. Numerosos científicos, entre los que se contaban Meitner y Hahn, reprodujeron los experimentos del bombardeo de

neutrones para estudiar con detalle todos estos procesos. La tarea se prolongó durante años debido principalmente a que algunas ideas muy asentadas en el marco de la física y de la química de la época frenaban que el resultado de los experimentos se interpretara correctamente. Al final, Meitner y Hahn pudieron demostrar que el bombardeo causaba la fragmentación del núcleo de uranio en dos partes.

En aquella época, numerosos científicos de diferentes países realizaron descubrimientos cruciales acerca de la naturaleza del átomo que fueron encajando hasta conformar un paisaje teórico y experimental de enorme complejidad. Un nuevo paradigma en la comprensión de la estructura de la materia en el que destacan figuras señeras de la física del siglo XX como el neozelandés Ernest Rutherford, la pareja formada por los franceses Irène Curie y Frédéric Joliot, el estadounidense Ernest Lawrence o el italiano Enrico Fermi.

Quizá el aspecto más valioso al que contribuyó el descubrimiento de la fisión es el aprovechamiento de la cantidad de energía que se encuentra contenida dentro de cada núcleo, y que se manifiesta cuando se produce su desintegración. Tras la escisión del núcleo, el uranio deja de serlo como tal para transformarse en elementos químicos diferentes, más ligeros, como pueden ser el kriptón o el bario. Tal como demostró Meitner, la energía liberada en la desintegración, es decir, la energía potencialmente contenida en el núcleo, podía calcularse a partir de la equivalencia entre materia y energía descubierta por Albert Einstein en su teoría de la relatividad. Como la suma de las masas de todos los productos de la desintegración es ligeramente inferior a la masa del átomo primigenio, siguiendo a Einstein, se concluye que la diferencia en masa se ha transformado y liberado en forma de energía.

La energía que proporciona la escisión de un solo núcleo puede parecer ínfima en términos absolutos, pero cuando es el elemento uranio el que se desintegra, se emiten también neutrones. Estos neutrones, a su vez, pueden convertirse en los causantes de nuevas fisiones. La energía procedente de estas reacciones de fisión en cadena se conoce como «energía nuclear». Leó Szilárd y Enrico Fermi fueron los que hallaron el proceso conocido como

«reacción en cadena». La fisión, pues, supone desatar la potencia contenida en el interior del átomo. Entender su estructura, interacciones y mecanismos involucrados es fundamental para controlar y aprovechar este poder.

La fisión nuclear ha quedado históricamente ligada a una fecha: el 6 de agosto de 1945, cuando el bombardero *Enola Gay* despegó de las islas Marianas para arrojar, unas seis horas más tarde, la bomba nuclear que arrasó la ciudad japonesa de Hiroshima. «Little Boy» —así se bautizó a esa bomba nuclear— desencadenó una energía de un poder destructor muy superior al de cualquier otra arma inventada por el ser humano hasta ese momento. Lise nunca quiso involucrarse en el desarrollo de la bomba a pesar de que se le ofreció la posibilidad de participar en el Proyecto Manhattan desarrollado por Estados Unidos. Años más tarde Meitner se comprometió con varias iniciativas relacionadas con el uso pacífico de la energía nuclear, y también aceptó servir con este mismo fin para la Agencia Internacional de Energía Atómica de la Organización de las Naciones Unidas. Desde la década de 1950, surgieron numerosas iniciativas para tratar de explotar comercialmente la energía nuclear, lo que dio lugar a las primeras centrales nucleares destinadas a la producción de electricidad.

Meitner, que había sido la primera mujer en lograr un doctorado en ciencias de la Universidad de Viena —todo un acontecimiento para una universidad con quinientos años de historia—, también fue capaz de granjearse el respeto y la amistad de científicos como Max Planck, Albert Einstein o Ludwig Boltzmann. Para Einstein, Meitner era «nuestra Marie Curie». Gran polemista, mantuvo intensos debates sobre física cuántica con sus principales protagonistas, como Niels Bohr o Werner Heisenberg, en encuentros de tipo científico, como las conferencias Solvay. Este clima de confianza se quebró tras la irrupción del nazismo. Meitner reprochó a los físicos de origen alemán como Hahn o Heisenberg el hecho de que durante la época nacionalsocialista hubieran mirado a otro lado y no mostraran el menor remordimiento por lo que los dirigentes alemanes estaban haciendo. A pesar de que tras la Segunda Guerra Mundial en varias ocasiones tuvo ocasión

de regresar a Alemania y recuperar su puesto laboral, rechazó esta posibilidad porque no podía volver a trabajar con científicos que habían contribuido —o por lo menos tolerado— al horror nazi. Tal como explicó ella misma, los «escrúpulos morales» le impidieron regresar. Cuando tuvo noticias de los campos de concentración de Buchenwald y de Bergen-Belsen, escribió a Hahn que «se debería obligar a personas como Heisenberg a que miraran estos campos y a su gente torturada, y a millones como él». Para Meitner, los alemanes no podían escudarse en la ignorancia porque «vosotros no quisisteis ver, era demasiado perturbador».

Meitner es un referente científico y moral, y una persona que sintió una irrefrenable vocación científica, tal como expuso en una conferencia ante la Unesco en 1953:

> La ciencia hace que la gente busque desinteresadamente la verdad y la objetividad; enseña a la gente a aceptar la realidad, con maravilla y admiración, sin mencionar además el profundo asombro y alegría que el orden natural de las cosas reporta al verdadero científico.

1878 Nace en Viena (entonces capital del Imperio austrohúngaro), el 7 de noviembre, Lise Meitner, la tercera de los ocho hijos de Philipp Meitner y Hedwig Skovran.

1901 Inicia los estudios de física en la Universidad de Viena.

1902 Asiste a las clases de Ludwig Boltzmann.

1906 Se convierte en la primera mujer en doctorarse de la Universidad de Viena. Inicia sus estudios sobre radiactividad.

1907 Traslada su residencia a Berlín para asistir a las clases de Max Planck. Allí conoce a Otto Hahn.

1908 Meitner descubre el retroceso del núcleo tras una emisión radiactiva.

1912 Se convierte en asistente de Planck. Se inaugura el Instituto Kaiser Wilhelm de Química, su lugar de trabajo durante los próximos treinta años.

1915 Decide presentarse voluntaria como técnica en rayos X para el ejército austriaco. Hahn empieza a trabajar en la elaboración de gas venenoso.

1918 Meitner y Hahn publican el artículo con el descubrimiento del elemento 91 de la tabla periódica, que tras algunas deliberaciones pasa a llamarse protactinio (Pa).

1921 Viaja a Copenhague y traba una gran amistad con Niels Bohr. Dos años más tarde, ejerce como profesora en la Universidad de Berlín, durante diez años.

1933 Hitler alcanza el poder y se le impide a Meitner que siga impartiendo clases.

1934 Sigue con atención las investigaciones de Enrico Fermi relacionadas con los transuránicos. Con Hahn y posteriormente Strassmann, inicia un estudio detallado de los transuránicos.

1938 Se produce la anexión de Austria. En junio se ve obligada a abandonar Alemania. Un año después, Meitner publica junto a Otto Frisch el resultado de su interpretación del experimento de Hahn y Strassmann.

1947 Abandona el Instituto Manne Sighbahn para trabajar para el Departamento de Física del Instituto Real de Tecnología en Estocolmo.

1949 Meitner y Hahn reciben la medalla Planck. Cuatro años más tarde, se retira.

1959 Se inaugura el Instituto Hahn-Meitner para la investigación nuclear en Berlín.

1966 Junto a Hahn y Strassmann, recibe el premio Enrico Fermi por el descubrimiento de la fisión.

1968 Muere en Cambridge, Reino Unido, el 27 de octubre.

CAPÍTULO 1

Un paseo por la nieve

La mayor aportación de Lise Meitner a la ciencia fue el descubrimiento, cuando ya se vislumbraba el fin de su carrera, de la fisión nuclear. Visualizó por primera vez el mecanismo de este proceso durante un paseo por la nieve con su sobrino, el también científico Otto Robert Frisch. Llegar a su comprensión no fue una casualidad, sino el resultado de años de trabajo junto a Otto Hahn y Fritz Strassmann.

A finales de 1938, Lise Meitner recibió una carta de su colega, el químico alemán Otto Hahn (1879-1968). Meitner tenía entonces ya sesenta años y se encontraba en Estocolmo trabajando en el Instituto de Física Manne Siegbahn, una institución universitaria noruega que la había acogido en condición de refugiada. Meitner había tenido que huir de la Alemania nazi de forma precipitada para salvar su vida, pero en Suecia se encontró sola y carente de un buen laboratorio. Después de haber trabajado en una de las principales instituciones científicas de Alemania, donde había desarrollado su brillante carrera profesional, en esos momentos no podía proseguir su actividad experimental, lo que no hacía sino agravar su tristeza. Sin embargo, la carta de Hahn, con quien había trabajado en equipo durante décadas, contenía una información sorprendente: le explicaba los resultados de un experimento que la propia Meitner le había animado a realizar.

Para sus estudios sobre el núcleo atómico, junto con el químico alemán Fritz Strassmann (1902-1980), habían estado bombardeando uranio con neutrones, una técnica que aprendieron del físico italiano Enrico Fermi (1901-1954). En el proceso, el núcleo absorbía un neutrón. De esta manera, se provocaba un proceso radiactivo por el que se emitían desintegraciones beta. Pero lo que no esperaban es que entre los productos de la reacción se detectara el elemento bario. Para Hahn, la presencia del bario en

el proceso era un completo misterio, y no dudó en compartir el problema con su antigua colaboradora.

El bario es un elemento mucho más ligero que el uranio. Si en los experimentos se partía de muestras de uranio puro, ¿de dónde provenía el bario? ¿O acaso se había generado durante el proceso? El bario parecía, simplemente, que no debería estar ahí. El conocimiento físico y químico de la época no explicaba que se produjera un elemento como el bario, radicalmente distinto al uranio.

«La señorita Meitner —profesora Meitner— ha tenido que abandonar nuestro laboratorio en julio de 1938 a causa de estas cosas del régimen de Hitler, y ha tenido que ir a Suecia. Y Strassmann y yo mismo hemos tenido que trabajar en solitario de nuevo hasta que en otoño de 1938 encontramos extraños resultados.»

— Otto Hahn.

Hahn había empleado un procedimiento químico muy preciso, la «cristalización fraccional», para aislar e identificar este elemento en las muestras, por lo que las posibilidades de error eran escasas. En la carta, Hahn escribió:

> Quizá puedas dar con alguna clase de explicación fantástica. Sabemos que [el uranio] realmente no puede estallar así como así para convertirse en bario.

El bario tiene 56 protones en su núcleo. Comparado con el uranio, que tiene 92, el bario contiene en torno a la mitad de protones. La explicación más sencilla parecía ser que el neutrón, después de ser absorbido por el núcleo del uranio, generaba una reacción tras la cual el núcleo original se escindía en dos. Sin embargo, este mecanismo no resultaba en absoluto intuitivo en base al conocimiento en radiactividad de la época.

Así, a finales de la década de 1930, se creía que el núcleo era una estructura sólida y estable, en el centro del átomo, de modo

HAHN ESCRIBE A MEITNER

La carta que Hahn remitió a Meitner está fechada el 19 de diciembre de 1938. Fue escrita desde el propio laboratorio, como si no pudiera siquiera esperar a llegar a casa y escribirla para transmitirle las noticias. En ella se puede leer:

> ¡Querida Lise!
> Son ya las once de la noche y a las 11:45 vendrá Strassmann; a ver si finalmente me puedo ir a casa. En realidad, hay algo acerca de los «isótopos del radio» que es tan destacable que de momento solo te lo contamos a ti. Las vidas medias de los tres isótopos han sido determinadas de una manera bastante exacta, pueden separarse de todos los elementos excepto del bario, todas las reacciones son consistentes con el radio. Solo una no lo es, a menos que se den coincidencias muy insólitas, el fraccionamiento no funciona. Nuestros isótopos de radio actúan como si fueran bario [...] Así que, por favor, piensa si hay alguna otra posibilidad. ¿Quizá un isótopo del bario con un peso atómico muy superior a 137? Si se te ocurre algo que se pueda publicar entonces sería aún en cierto modo un trabajo de los tres.



Otto Hahn en 1938.

El bario y el radio forman parte del mismo grupo —comparten columna— de la tabla de los elementos químicos. Esto significa que tienen en común numerosas características químicas, y se diferencian fundamentalmente en su masa. Mientras que el radio se encuentra contiguo al uranio, por lo que podía ser el producto predecible de la absorción de un neutrón por parte del núcleo, la presencia del bario era por completo inexplicable.

que parecía imposible que se partiera sin más tras absorber una partícula sin carga eléctrica, como es el neutrón. Previamente, otros físicos habían logrado arrancar algunos protones tras bombardear núcleos atómicos, pero no concebían que un núcleo tan pesado como el uranio pudiera dividirse. La comunidad científica,

con Enrico Fermi a la cabeza, había llegado a la conclusión de que cuando el uranio absorbía un neutrón, se desencadenaban una serie de reacciones nucleares que daban lugar a átomos precisamente con un número atómico mayor que el del propio uranio. La detección del elemento bario era, por tanto, un hecho sorprendente, inesperado y que planteaba una nueva incógnita sobre el modelo teórico en el que se basaban y progresaban los físicos y químicos de la época. Aquellos resultados indicaban que, o bien había un error en el diseño y ejecución de los experimentos, o alguna de las premisas del conocimiento aceptado no era aplicable o difería.

Meitner seguía al día de todos esos adelantos a pesar de las durísimas circunstancias personales que explicaban su presencia en Noruega. Había tenido que abandonar su hogar, y sus únicas pertenencias eran las que pudo encajar en las dos maletas con las que escapó de Alemania. Huyó con apenas diez marcos en el bolsillo y acababa de recibir la noticia de que uno de sus hermanos había sido aprisionado y conducido a un campo de concentración. Aunque posteriormente sería liberado, para Meitner era una noticia lamentable. Respecto a su porvenir, solo se adivinaba el fin de su carrera científica, un triste destino tras todos sus años de trabajo en el Instituto Kaiser Wilhelm de Berlín, codeándose con los más importantes científicos de la época.

Meitner estaba a la espera de la visita de su sobrino, Otto Robert Frisch, que iba a pasar unos días con ella a propósito de la Navidad. Frisch también se dedicaba a la física, pasión que había nacido de la mano de su tía, y en esos momentos estaba trabajando en Copenhague en el Instituto de Física dirigido por Niels Bohr. Tal como explicó él mismo:

> Lise Meitner estaba en Suecia y se encontraba sola, por lo que me ofrecí para irla a visitar [...] Cuando llegué estaba pensativa debido a una carta de Hahn.

Meitner y Frisch se encontraron en Kungälv, una localidad próxima a Estocolmo, donde residía una amiga de Lise, Eva von Bahr-Bergius. Ambas físicas experimentales, Meitner y Von Bahr-

Bergius trabaron amistad décadas atrás en Berlín. En esos momentos especialmente difíciles, su amiga significó un gran apoyo para ella.

Frisch llegó al hotel de Kungälv donde se iban a hospedar cuando ya había anochecido. Venía desde Copenhague, trayendo sus esquís, para hacerse compañía mutuamente en esos momentos tan dramáticos. Se encontraron por la mañana para el desayuno y, desde el primer momento, la conversación estuvo monopolizada por el problema de la presencia de bario. Meitner le comentó:

> Bario, no lo puedo creer. Tiene que haber algún tipo de error. No pueden saltar un centenar de partículas del núcleo de un solo golpe. Es fantástico. Parece imposible que un solo neutrón haya podido hacer eso.

Por sus palabras, la consideración sobre un posible error de Hahn no tenía cabida, dado que Meitner conocía de primera mano sus grandes habilidades como químico. No había duda posible en su buen hacer.

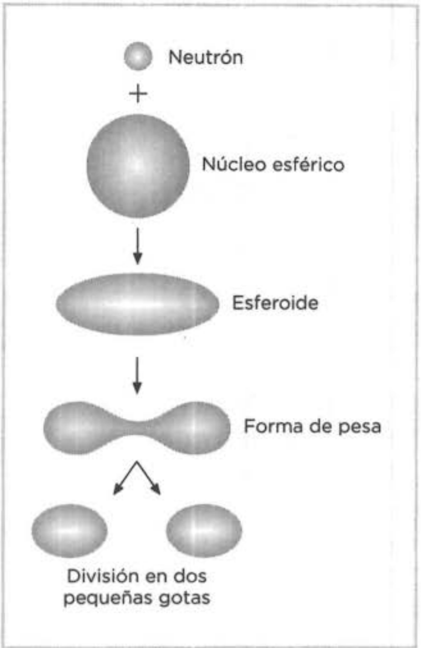
En ese momento, decidieron salir a pasear. Estaba nevando, por lo que Frisch optó por calzarse sus esquís, mientras que Meitner iba a su lado andando. El problema era cómo encajar el bario en esa secuencia experimental. Tal como entendían el núcleo atómico, resultaba imposible arrancar un número tan elevado de protones con un único impacto. Además, aunque fuera posible partir el núcleo, sería necesario invertir en esta tarea una cantidad de energía enorme, imposible de alcanzar en el laboratorio de Hahn. Además, el neutrón, de carga eléctrica neutra, parecía una partícula en cierto modo demasiado inofensiva como para desestabilizar el núcleo atómico y llegar a producir su escisión.

Para Meitner, resultaba lógico pensar que el átomo de uranio se había dividido, tal como quedaba probado por la presencia del bario. Era obligado entonces considerar el modelo del propio núcleo atómico. Ambos físicos conocían la teoría creada por el ucraniano George Gamow (1904-1968) y defendida por el danés Niels Bohr (1885-1962), según la cual se podía entender el núcleo

atómico como una gota de agua (veáse la figura). Según esta concepción, el núcleo del átomo no es una estructura rígida y dura, sino que sería moldeable, fluido como una gota de agua, y mantendría su estabilidad gracias a una especie de tensión superficial.

En base a este modelo del núcleo, ya no era tan difícil considerar la posibilidad de que el uranio pudiera dividirse. Si se piensa en el núcleo como una gota de agua, tras el impacto de la partícula, la esfera se deformaría, formando una estructura alongada, hasta que acabaría por romperse en dos porciones.

El uranio, al ser un átomo tan masivo, en cierto modo sería más propenso a romperse, tal como expresó el propio Frisch:



Representación del núcleo atómico como una gota de agua y las distintas etapas por las que tenía que pasar para que se produjera la fisión nuclear.

> El núcleo de uranio de hecho se parecía a una gota muy tambaleante, inestable y dispuesta a dividirse a poco que se la incitara a ello.

Estaban paseando por un camino de montaña y rodeado de árboles, y en ese momento decidieron sentarse a descansar en un tronco caído. Para saber si el proceso de escisión nuclear que estaban considerando era posible, pensaron en calcular el intercambio energético que tendría lugar en la reacción. Meitner tomó un trozo de papel que guardaba en el bolsillo y dibujaron un esquema de lo que podría estar ocurriendo en el núcleo, y se pusieron a hacer los cálculos.

Meitner recordaba todas las ecuaciones necesarias y los valores involucrados para hacer los cálculos allí mismo. Por un lado, había que tener en cuenta la tensión superficial del núcleo, es decir, la resistencia a deformarse. En el momento en el que el núcleo de uranio se escindiese, se formarían dos núcleos, ambos con una carga eléctrica positiva, lo que se traduciría en una con-

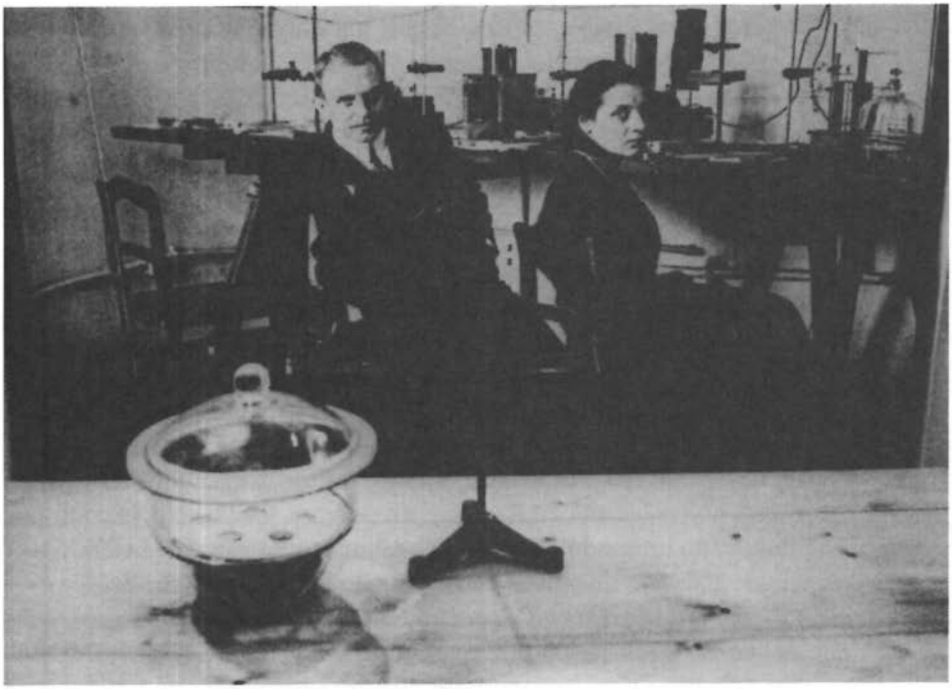






FOTO SUPERIOR:
Otto Hahn con Lise Meitner en su laboratorio de Berlín, en 1913.

FOTO INFERIOR IZQUIERDA:
Meitner en el año 1946.

FOTO INFERIOR DERECHA:
Otto Hahn en 1944, año en el que recibió el premio Nobel de Química por su descubrimiento de la fisión de núcleos pesados. El premio le fue entregado en 1945, y a pesar de tratarse de un logro conjunto, Meitner quedó descartada en la entrega del galardón.

siderable repulsión mutua. Según los cálculos de Meitner, esta repulsión debía ser del orden de 200 MeV.

Así pues, esa energía debía estar contenida en el núcleo de uranio. Se trataba, por otro lado, de una cantidad de energía nada despreciable para tratarse de un único átomo. Meitner de nuevo observó que la masa atómica del uranio y la suma de las masas atómicas de los dos fragmentos resultantes diferían el equivalente a la quinta parte de la masa de un protón. Usando la fórmula de Einstein $E=mc^2$, calculó que la quinta parte de la masa de un protón equivale a una energía del orden de 200 MeV. Es decir, el resultado parecía encajar con lo observado, por lo que el proceso, tal como lo habían concebido, adquiría de repente una considerable robustez. Meitner y Frisch regresaron del paseo convencidos de que el núcleo atómico no era una estructura sólida y dura, sino moldeable y blanda como una gota de agua, y en base a ello habían elaborado un modelo para los resultados observados, la fisión nuclear, apoyada en varios principios de la física moderna.

Frisch regresó a Copenhague y Meitner a Estocolmo. Quedaban algunos cabos por atar, que resolvieron telefónicamente. En concreto, les preocupaba cómo determinar, como explicó Meitner, «la enorme cantidad de energía liberada en el proceso de fisión». Cada uno de ellos ideó un sistema de caracterización para los productos de la reacción nuclear: «o bien midiendo la ionización por los fragmentos de fisión expulsados con gran energía —método que Frisch propuso y aplicó sin tardanza— o bien recogiendo los productos de fisión en virtud de su energía de retroceso, operación que yo sugerí y Joliot llevó a la práctica poco tiempo después».

Con gran excitación, Frisch quiso reunirse con Bohr, que estaba a punto de partir hacia Estados Unidos, y apenas le pudo conceder unos pocos minutos de su tiempo. Cuando escuchó el razonamiento de Meitner y Frisch, Bohr se dio cuenta de que en todo momento habían tenido todas las piezas para resolver el problema, aunque solo tras la revelación que tuvo Meitner habían encajado, y exclamó: «¡Mira que hemos sido idiotas! ¡Ah!, pero es maravilloso. Es tal como debe ser. ¿Han escrito usted y Lise Meitner ya un artículo sobre ello?». A lo que Frisch respondió:

EL DESCUBRIMIENTO EN LA NIEVE

En un escrito biográfico titulado «Aciertos y desaciertos de la energía nuclear», Meitner hacía referencia a este episodio en la nieve y al instante preciso en que dieron con la imagen del núcleo atómico entendido como una gota de agua. Meitner se refirió a ese momento con las siguientes palabras:

> En el curso de nuestra discusión, llegamos a la imagen siguiente: si el núcleo de uranio, de carga elevada y cuya tensión superficial está sensiblemente disminuida por la repulsión mutua de los protones, alcanza gracias al neutrón capturado un movimiento colectivo de intensidad suficiente, puede estirarse; se forma una especie de estrangulamiento que provoca finalmente una división en dos núcleos más ligeros, aproximadamente iguales entre sí, que tienden entonces a separarse en virtud de la repulsión mutua. Calculamos en 200 MeV aproximadamente la energía liberada en este proceso. Dado que el fenómeno se asemejaba al proceso de división celular, le dimos, a propuesta de Frisch, el nombre de «fisión» y subrayamos su carácter inédito titulando la memoria al respecto *A New Type of Nuclear Reaction* [«Un nuevo tipo de reacción nuclear»].

«Aún no, pero lo haremos enseguida». Posteriormente, un biólogo explicó a Frisch que al proceso de división celular se lo denomina «fisión», de modo que Frisch optó por acuñar la denominación fisión nuclear para referirse al proceso que habían contribuido a aclarar.

El artículo apareció en la revista *Nature* a principios de 1939 con el título «Desintegración de uranio por neutrones: un nuevo tipo de reacción nuclear», firmado por Lise Meitner y Otto Frisch. Un poco antes había aparecido el artículo firmado por Otto Hahn y Fritz Strassmann en el que exponían su descubrimiento de la presencia de bario tras bombardear el uranio con neutrones.

Tal como señaló Meitner, ella y su sobrino enviaron el artículo a la revista *Nature* el 16 de enero de 1939. Sin embargo, este no apareció publicado hasta el 18 de febrero. Durante el intervalo, Bohr había llegado a Estados Unidos. Iba acompañado por su colaborador Léon Rosenfeld (1904-1974), físico belga con el que había discutido detalles de la fisión durante la travesía. A

pesar de que Bohr se había comprometido a no divulgar el fenómeno hasta que se publicara el artículo de Meitner y Frisch, Rosenfeld o bien ignoraba este acuerdo o hizo caso omiso. De manera que en sus primeras conferencias en Estados Unidos comunicó a la audiencia el descubrimiento. La noticia causó una gran sensación y los asistentes, entre los que se encontraban físicos de la universidad de Columbia, se animaron a reproducir los experimentos que demostraban la fisión. Muy pronto la noticia se extendió por toda la comunidad científica.

El descubrimiento de la fisión nuclear no fue fruto solo de la casualidad ni de la inspiración en una mañana de invierno, sino que fue la merecida recompensa de años de duro trabajo en los que Meitner además tuvo que superar infinidad de incógnitas, así como problemas tanto científicos y laborales como personales. La fisión nuclear fue también el resultado de un trabajo en colaboración, y contó con la aportación de un cierto número de científicos. En la vida de Meitner se recogen las contradicciones y la maldad de una época, pero también ella es el ejemplo de cómo sobreponerse a todas estas vicisitudes, y con la firme determinación de quien siente curiosidad por desentrañar el mundo que nos rodea.

CAPÍTULO 2

La radiactividad

A principios del siglo XX, la radiactividad era un atractivo objeto de estudio de la física moderna, sorprendente y prometedor. Meitner, que desde su infancia se había sentido atraída hacia la física, inició su carrera como investigadora estudiando la radiactividad, y, en concreto, el fenómeno de la dispersión de partículas alfa.

Desde finales del siglo XIX, se sucedieron una serie de importantes descubrimientos que sacudieron los sólidos cimientos de la ciencia física. La física clásica, con áreas de estudio como la mecánica, la termodinámica o la óptica, se vio superada por nuevos marcos teóricos, como la teoría cuántica, la física nuclear y de partículas, o la relatividad. Precisamente, un fenómeno como el de la fisión nuclear cabe entenderlo en el contexto de la física nuclear, y guarda una estrecha relación con los procesos radiactivos.

La radiactividad fue uno de los fenómenos que encauzó el camino hacia el descubrimiento de la estructura interna del átomo. La radiación emitida por elementos radiactivos se había detectado para determinados elementos materiales, como el uranio, en forma de partículas o radiación. Una vez inaugurado el siglo XX, otra de las grandes aportaciones a la nueva física fue la teoría de la relatividad especial de Albert Einstein. Einstein puso al descubierto la equivalencia entre masa y energía: «La masa y la energía son manifestaciones diferentes de una misma cosa», escribió el genio alemán en 1905. Esta idea la plasmó matemáticamente en la fórmula $E=mc^2$, donde E es la energía, m la masa y c la velocidad de la luz, que es una constante universal, cuyo valor en el vacío es $\sim 3 \cdot 10^8$ m/s. La materia es energía, y la fisión nuclear sería uno de los fenómenos en los que se llegó a hacer manifiesta esta equivalencia.

Se trataba, sin duda, de un momento extraordinario para la física. Alguien, como fue el caso de Meitner, que iniciara sus estudios a inicios del siglo XX se encontraba con constantes y excitantes novedades. No es de extrañar, por tanto, que se decantara por la labor investigadora y en sus inicios escogiera experimentos en torno a la radiactividad, poniendo de manifiesto sus inquietudes científicas y una vocación que la ayudó a superar todos los obstáculos.

EL ORIGEN DE LA RADIACTIVIDAD

La radiactividad era un proceso cautivador, y, sobre todo, una rama totalmente nueva de la ciencia física, un territorio por explorar. Hasta 1896, nadie se había podido imaginar que en la materia se produjeran semejantes procesos de forma espontánea, hasta que ese mismo año el físico francés Antoine-Henri Becquerel (1852-1908) la descubrió.

En realidad, Becquerel estaba investigando los rayos X, descubiertos el año anterior, y quería saber si estos guardaban alguna relación con la fluorescencia. La fluorescencia es el fenómeno por el cual algunos minerales absorben energía en forma de radiación electromagnética (por ejemplo, luz visible) y luego la vuelven a emitir también con radiación electromagnética, pero a una longitud de onda distinta a la originaria. Ocurre independientemente de la temperatura del material, de modo que son minerales que pueden brillar incluso a temperatura ambiente. A diferencia de lo que ocurre con otros procesos luminiscentes como la fosforescencia, cuando la fuente de energía que excita el mineral desaparece, deja de observarse la luz de fluorescencia.

Becquerel decidió estudiar distintos elementos fluorescentes y comprobar si estos emitían rayos X al ser expuestos a la luz. Inició su investigación con una sal de uranio que expuso a la luz solar, y la colocó sobre una placa fotográfica cubierta con un paño. Cuando observó la silueta de la sal de uranio impresa en la placa, consideró que aquello confirmaba su hipótesis de que

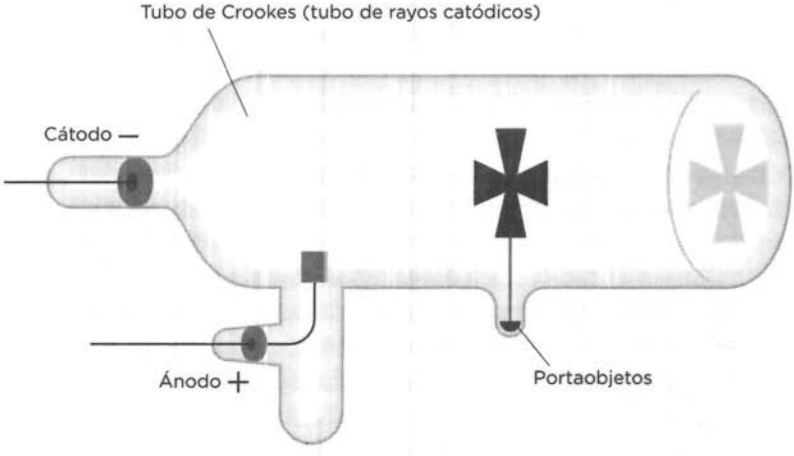
los rayos solares excitaban el material, reemitiéndose en forma de rayos X mediante un proceso de fluorescencia. Cuando quiso repetir el experimento, resultó estar nublado. Como no era un día apropiado para inducir la fluorescencia en el mineral con la luz solar, optó por guardar el uranio y la placa en un cajón. Para su sorpresa, días más tarde comprobó que la placa había quedado impresa de la misma manera que cuando la sal había sido expuesta a la luz solar. De ello se entendía que los rayos detectados que emergían del uranio poco tenían que ver con los rayos X, ni tampoco con la fluorescencia. Además, Becquerel había dejado una cruz de cobre entre el uranio y las placas fotográficas recubiertas, y dicha cruz había hecho de máscara, se podía apreciar como una sombra en la impresión de las placas. Se enfrentaba a un fenómeno desconocido, que años más tarde se bautizó como «radiactividad».

> «[Lise Meitner] es nuestra Marie Curie.»
>
> — Albert Einstein.

En las inmediaciones del Museo de Historia Natural donde trabajaba Becquerel, una joven de origen polaco se interesaba por la radiación recién descubierta, y decidió que sería el tema central para su doctorado. Se trataba de Marie Curie, quien sería la primera mujer a la que se le concedió el premio Nobel (en 1903, de Física), y posteriormente fue la primera persona que lo obtuvo en dos ocasiones, al concedérsele el segundo Nobel en 1911 (en esa ocasión, de Química). Junto a su marido, Pierre Curie, se dedicó a buscar más sustancias que emitieran radiactividad, entre las que hallaron el torio, el polonio —elemento nuevo bautizado en honor de su país natal— y el radio. Para determinar el peso atómico del radio, fue necesario emplear miles de toneladas de pechblenda, un mineral que contiene una ínfima proporción de uranio (aproximadamente un gramo de uranio puro por cada kilogramo de mineral) que escondía esa intensísima fuente radiactiva de radiación. Tras un laborioso trabajo, consiguieron reunir suficiente material para realizar sus estudios de manera consistente.

RAYOS CATÓDICOS Y RAYOS X

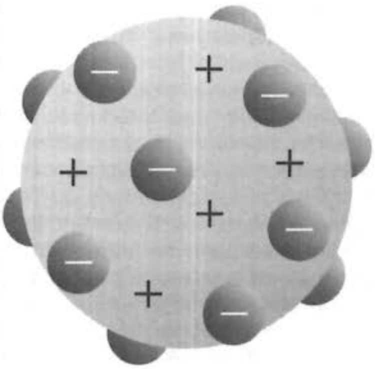
La investigación sobre los rayos catódicos nació a partir de un curioso fenómeno que había intrigado a los científicos. En 1857, el inventor alemán Heinrich Geissler (1814-1879), fabricante de tubos de vidrio, inventó una bomba de vacío, un dispositivo capaz de extraer el aire de un recipiente con mayor eficacia, con la que logró obtener una presión muy baja en el interior de los tubos. Disponiendo unos electrodos en el interior de uno de estos, observó que en el tubo se generaba una extraña luz. Posteriormente, el químico inglés William Crookes (1832-1919), al mejorar la técnica de la bomba de vacío, observó una versión de este fenómeno extraño, pero en aquella ocasión ya no se iluminaba el interior del tubo, sino que la luz se concentraba en uno de los extremos del tubo, propiamente en el vidrio. Al colocar un objeto —como una cruz de Malta de metal— en el interior del tubo a medio camino del electrodo y el extremo del tubo de vidrio, en el extremo opuesto se proyectaba su sombra (véase la figura). Este hecho indicaba que desde el cátodo se tenía que emitir algún tipo de rayo, luz colimada, que se plasmaba en la pared del tubo. Si en dicha pared se colocaba alguna sustancia fosforescente, esta se iluminaba como consecuencia de dichos rayos. A diferencia de la fluorescencia, el mineral fosforescente prolonga la emisión de luz hasta después de que la luz que hace de fuente de excitación se retire, y el período de reemisión de luz puede durar desde fracciones de segundo hasta incluso años —que es lo que hace que tales minerales sean capaces de brillar en la oscuridad—. Se habían descubierto los rayos catódicos, esto es, la emisión de electrones.



Más allá del tubo de Crookes
Para estudiar la naturaleza de estos rayos, el físico húngaro Philipp Lenard (1862-1947) realizó una importante contribución que le condujo a ser galardonado con el premio Nobel de Física en 1905. La intención de Lenard era tratar de estudiar los rayos fuera del tubo de Crookes. El problema que se le planteaba era el siguiente: el vidrio era imprescindible para crear el vacío y así producir rayos catódicos, pero a su vez se trata de un material que absorbe dichos rayos, de modo que no podían estudiarse desde el exterior del recipiente. Así las cosas, era necesario encontrar otro material capaz de mantener el vacío interior y que a la vez permitiera que los rayos catódicos salieran al exterior. Finalmente, halló que si abría una pequeña rendija en la pared del tubo de vidrio —posteriormente conocida como «ventana de Lenard», en su honor— y la tapaba con aluminio, por allí podían «escapar» los rayos, tal como observó mediante la sustancia fosforescente colocada a pocos centímetros del tubo. De esa manera, pudo observar que los rayos catódicos atravesaban el aluminio hasta iluminar el fósforo. Sin embargo, si colocaba la sustancia fosforescente a más de 10 cm de distancia del tubo, entonces el aire atenuaba los rayos, impidiendo la inducción de la fosforescencia en el mineral.

Unos rayos enigmáticos
En 1905, Wilhelm Röntgen (1845-1923), un físico alemán, profesor de Física de la Universidad de Würzburg, sintió una gran curiosidad por los experimentos realizados por Philipp Lenard. Röntgen se animó a montar un pequeño laboratorio en su propia casa para estudiar los rayos catódicos mediante los tubos equipados con las «ventanas de Lenard». Una noche decidió tapar la ventanilla de aluminio con un pequeño cartón para impedir que salieran los rayos catódicos. Al cerrar las luces y conectar el voltaje, pudo observar que, de forma inesperada, a un metro de distancia se originaba un cierto resplandor, una luz que se apagaba cuando desconectaba el voltaje en el aparato. Lo que se iluminaba era una pantalla cubierta con platino-cianuro de bario, una sustancia fluorescente. Aquel experimento indicaba que esos rayos no eran estrictamente iguales a los rayos catódicos: no solo el aire no los había absorbido, sino que antes habían logrado atravesar los distintos materiales que cubrían la ventanilla metálica. Llegó a la conclusión que de los procesos en los tubos de Crookes emergía un nuevo tipo de rayos con un gran poder de penetración en la materia sólida. Eran capaces de atravesar distintos materiales sólidos y también tejidos vivos —como inmediatamente pudo comprobar con la mano de su mujer— y su presencia era reconocible porque excitaban los materiales fluorescentes. Su hallazgo de los rayos X, cuyas aplicaciones en medicina fueron casi inmediatas, supuso la instauración del primer premio Nobel de Física de la historia, que le fue concedido en 1901.

EL ELECTRÓN



En el modelo atómico del pastel de pasas propuesto por Thomson, los electrones (las pasas), con carga eléctrica negativa, flotan en una especie de nube (la masa del pastel), cargada positivamente.

El descubrimiento del electrón se encuentra íntimamente ligado al desarrollo de los tubos de Crookes y a la observación de los rayos catódicos. El propio Crookes se dio cuenta de que los rayos catódicos se desviaban bajo la influencia de un campo magnético, y pudo determinar que su carga era negativa. En 1896, el científico británico Joseph John Thomson (1856-1940) realizó una serie de experimentos que le llevaron a demostrar que los rayos catódicos estaban formados por partículas, o corpúsculos, tal como él mismo los denominó. Thomson consiguió fabricar un tubo de Crookes en el que logró practicar un mejor vacío. Mediante la aplicación de campos electromagnéticos alrededor del tubo, pudo determinar la relación universal entre la masa y la carga de los electrones. Probando con distintos metales en los cátodos y ánodos y también variando los gases enrarecidos que permanecían en el tubo, concluyó que esta partícula era común a todos los átomos, de cualquier tipo de elemento. Estos experimentos le condujeron a proponer el modelo atómico del «pastel de pasas», en que el átomo estaría formado exclusivamente por electrones (las pasas) que flotarían en una nube cargada positivamente. El balance de cargas explicaría la neutralidad de cargas de los elementos.

LOS TIPOS DE RADIACTIVIDAD

Descubrir la existencia de otros elementos radiactivos constituía un paso importante, pero era necesario profundizar en otros aspectos. El físico neozelandés Ernest Rutherford (1871-1937), junto al químico inglés Frederick Soddy (1877-1956), llevó a cabo uno de los avances más sorprendentes y extraordinarios sobre

esta cuestión cuando en 1898, estando la Universidad McGill de Canadá, publicó que la radiactividad no era un único tipo de radiación, sino que se podían distinguir distintos tipos, identificables por su poder de penetración en la materia sólida y, como más tarde se supo, por su carga eléctrica. Rutherford llamó *rayos alfa* a la radiación menos penetrante. Posteriormente, el propio Rutherford confirmó que esta partícula estaba cargada positivamente. Los *rayos beta*, por su parte, tenían un poder de penetración mayor. En este caso, en 1900 fue Antoine-Henri Becquerel quien pudo identificar que la carga eléctrica de la radiación beta era idéntica a la de los rayos catódicos; es decir, se trataba de la misma partícula descubierta por J.J. Thomson años atrás: el electrón.

«Un electrón guarda la misma relación de tamaño con un átomo que la que una pelota de béisbol mantiene con la Tierra. O, como afirmó sir Oliver Lodge, si se pudiera aumentar el tamaño de un átomo de hidrógeno hasta que fuera como una catedral, un electrón sería del tamaño de una mota de polvo dentro de esa catedral.»

— WALDEMAR KAEMPFFERT (1877-1956), ESCRITOR CIENTÍFICO ESTADOUNIDENSE.

Los *rayos gamma* fueron los últimos en conocerse. La dificultad para detectarlos residía en su ausencia de carga eléctrica. Este tipo de emisión de radiación ya no se detectaba como una partícula, sino que compartía propiedades de las radiaciones que conforman el espectro electromagnético; era un tipo de radiación semejante a la de los rayos X, aunque mucho más energética. Fueron descubiertos en 1900 por el físico francés Paul Villard (1860-1934), aunque en un principio los confundió con los rayos X. Fue gracias a la ayuda de Rutherford que pudo establecerse que eran un tipo distinto de radiación electromagnética.

Debido a que los tres tipos de radiaciones tienen carga eléctrica diferente —positiva, negativa o neutra—, tienen un distinto

FIGURA 1:
Una de las características que distingue los tres tipos de radiación es su distinto poder de penetración en la materia.

FIGURA 2:
En presencia de un campo eléctrico, las partículas alfa (dotadas de carga positiva) se sienten atraídas hacia el polo negativo, de modo que su trayectoria se desvía en esa dirección, mientras que las partículas beta, de carga negativa, se desvían hacia el polo positivo. La radiación gamma, al ser neutra, mantiene una trayectoria rectilínea.

FIG. 1

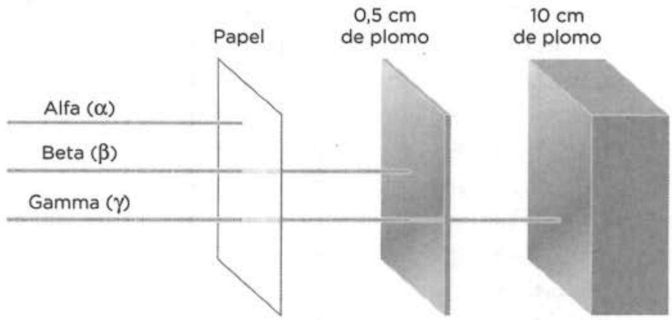
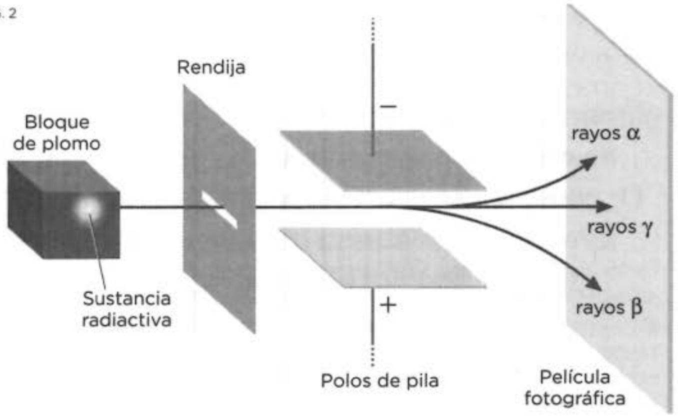


FIG. 2



poder de penetración en la materia (figura 1) y se comportan de forma diferente en presencia de campos eléctricos y magnéticos (figura 2). Al atravesar un campo eléctrico, los rayos alfa tienden a ser atraídos hacia el polo negativo, mientras que los rayos beta hacen lo mismo atraídos por el polo positivo. La trayectoria de los rayos gamma, en cambio, no se ve afectada por el campo magnético.

Todos estos acontecimientos estaban teniendo lugar en el momento en que Meitner decidió emprender sus estudios de física. Pero, ¿cómo pudo esta joven de origen judío no solo osar

dedicarse a la ciencia, sino conseguir convertirse en una de las principales figuras de la época? Es el momento de dirigirnos a Viena, su ciudad natal, para descubrir las claves que la condujeron a ser considerada uno de los referentes científicos de su tiempo.

LOS AÑOS EN VIENA

Nacida en Viena en noviembre de 1878, cuando dicha ciudad aún era la capital del Imperio austrohúngaro, Meitner era una joven que desde su infancia se sintió atraída por las matemáticas y la física, pero hasta ese momento, las universidades prohibían la entrada a las mujeres. Solo el interés y la pasión no hubieran sido suficientes para que pudiera acceder a unos estudios superiores. Si precisamente en esa época no se hubiera vivido una transformación social —que previamente ya había favorecido, por ejemplo, a judíos, que también habían quedado hasta entonces excluidos de la universidad—, sus sueños sobre la posibilidad de estudiar física jamás se habrían realizado.

Meitner vivió en Viena durante veintinueve años, y no regresó jamás allí, aunque siempre trató de mantener la nacionalidad austriaca a pesar de los acontecimientos históricos que le tocó vivir. Sus padres, Philipp Meitner y Hedwig Skovran, eran de origen judío y sus familias procedían de Moravia. Tuvieron ocho hijos y Lise fue la tercera en nacer.

Desde mediados del siglo XIX, el Imperio austrohúngaro vivió un proceso de transformaciones liberales que pretendía dejar atrás de forma definitiva las estructuras arcaicas. Era un momento en el que la ciudad estaba creciendo exponencialmente, lo que obligó a derrumbar las murallas que la asfixiaban para que pudieran incorporarse miles de recién llegados, atraídos en principio por el bullicio de los teatros y la intensa actividad musical. Sin embargo, la realidad que tenían que afrontar era muy diferente: habitualmente acababan viviendo hacinados en un entorno insalubre, sufrían unas condiciones laborales muy precarias y el desempleo era también muy elevado.

VIENA, CAPITAL CULTURAL DE EUROPA

En 1866, Austria se enfrentó a una Prusia liderada por el general Otto von Bismarck y en pocas semanas cayó derrotada. Fruto de esta guerra, los llamados «estados germánicos» se unificaron en torno a Prusia, originando el Imperio alemán, mientras que Austria se unió a Hungría —dos estados bajo una misma corona—, formando el Imperio austrohúngaro. A finales del siglo XIX, Viena seguía albergando un marco social en el que la alta sociedad mantenía unas costumbres encorsetadas, como correspondía a su estatus de capital imperial. Pero en ella se fue fraguando un espíritu crítico ejemplificado por una serie de intelectuales que pasarían a ser parte imprescindible de la historia de diferentes disciplinas. En aquella Viena de finales del siglo XIX coincidieron, por ejemplo, el psicoanalista Sigmund Freud y el extraordinario músico Gustav Mahler, así como el periodista satírico Karl Kraus, quien desde el periódico *Die Fackel* («la antorcha») denunciaba la hipocresía de la sociedad de la época. En la filosofía, tuvo a Ludwig Wittgenstein y a Karl Popper como principales representantes vieneses. Y en el campo de la física, destacaron principalmente Ludwig Boltzmann y la propia Lise Meitner. Esta intensa atmósfera imperial se vino abruptamente abajo en 1914 con el asesinato del heredero del trono del Imperio austrohúngaro, tras lo cual se inició la Primera Guerra Mundial.





Karl Kraus (izquierda) y Ludwig Wittgenstein formaron parte de la diversidad cultural reinante en la Viena de finales del siglo XIX.

Viena era una ciudad de mayoría católica, donde los judíos habían sido perseguidos y carecían de los mismos derechos que el resto de ciudadanos, como lo era recibir formación universitaria. Esto cambió a raíz principalmente de la constitución de 1867, que defendía «los derechos fundamentales de todos los ciudadanos». A pesar de que el antisemitismo seguía presente en la sociedad vienesa, Philipp Meitner pudo aprovecharse de este giro para estudiar derecho y posteriormente ser uno de los primeros judíos en ejercer la profesión. Fue una persona con numerosas inquietudes políticas, y su casa era un hervidero de ideas y debate sobre el futuro del país.

> «Hoy en día parecería inimaginable, pero mirando atrás, una se da cuenta con sorpresa de cuántos problemas existían por aquel entonces en la vida de las chicas jóvenes. Uno de los problemas más difíciles de resolver era la posibilidad de recibir una formación intelectual normal.»
>
> — Lise Meitner.

Meitner se referiría posteriormente a la «atmósfera intelectual extraordinariamente estimulante en la que crecimos mis hermanos y hermanas y yo misma». Su madre se preocupó por proporcionar a sus hijos una sólida formación musical. Todos aprendieron a tocar el piano y Auguste —o Gusti, como la llamaban—, la segunda de las hijas, llegó a ser una concertista de piano profesional. Gusti fue la madre de Otto Robert Frisch, quien más tarde tendría también una brillante carrera como físico —una pasión por la ciencia que nació gracias a la influencia precisamente de su tía—. Tal como se ha adelantado en el capítulo anterior, Frisch participó directamente en las investigaciones sobre el desarrollo de la fisión nuclear.

La familia Meitner vivía en el barrio de Leopoldstadt, donde se concentraban principalmente las familias de origen judío, razón por la cual había numerosas sinagogas. La familia de Meitner nunca fue educada en el judaísmo ni tampoco en ninguna otra religión —a pesar de que convertirse al cristianismo hubiera podido

facilitar algunos trámites legales—. Optaron por procurar que la religión no interfiriera en la integración de sus hijos en la ciudad. Ya cuando fue mayor de edad, Meitner decidió bautizarse y convertirse al protestantismo.

La propia Lise explicaba que en una ocasión, durante su infancia, su abuela le advirtió de que no podía coser durante el Sabbath porque si lo hacía los cielos se derrumbarían sobre ella. Como quería probar si era cierto, decidió ponerse a hacer un bordado una mañana de sábado. Al principio daba las puntadas con cierto temor, pero casi inmediatamente se dio cuenta de que no ocurría nada. Su curiosidad la llevaba a poner a prueba todo aquello que desconociera. Al ser una familia numerosa, vivían con ciertas estrecheces, aunque en su casa no faltaron jamás, por ejemplo, los libros. Uno de los logros más extraordinarios de la familia fue que todos sus hijos recibieran una formación superior.

EN LA UNIVERSIDAD

Las mujeres no tenían acceso a la universidad, puesto que tampoco tenían a su alcance la educación secundaria necesaria para optar a una de las plazas. Por este motivo, cuando en 1892 terminó sus estudios fundamentales, Meitner ya no tenía la obligación —ni especialmente la posibilidad— de seguir asistiendo a la escuela. A los trece años, cualquier joven vienesa se preparaba para el matrimonio aprendiendo las labores del hogar. El escritor Stefan Zweig describía esa forma de vida con estas palabras: « [...] así es como la sociedad de aquel tiempo deseaba que fueran las chicas jóvenes: estúpidas y sin formación». Sin embargo, existía la posibilidad de especializarse en una materia para convertirse en maestra, lo que no requería ningún grado universitario. Lise escogió el francés.

Pero en el Imperio soplaban vientos de cambio. En 1897 se aceptó que las mujeres accedieran a las universidades austriacas. Era la gran oportunidad de Meitner. En una conversación con su padre, le pidió contar con él para poder recibir una «educación científica». Aunque no iba a encontrarse con un camino fácil, siempre pudo contar con el apoyo paterno.

Solo se podía acceder a la universidad si se habían realizado los estudios secundarios durante ocho años, y se había aprobado el examen de acceso (conocido como *Matura*). A aquellas mujeres que aspiraban a entrar en la universidad pero no habían hecho estos cursos, se les ofreció la posibilidad de realizar el examen de acceso. Lo que en la educación regular se impartía en ocho años, Meitner lo afrontó en tan solo dos. Se tomó los estudios con absoluta seriedad, hasta el punto de que incluso sus hermanos, cuando la veían andando por casa sin un libro en las manos, se burlaban de ella diciéndole que iba a suspender.

Siempre se sintió muy agradecida a su tutor, el físico Arthur Szarvassy, de quien aseguraba que «tenía un don real para presentar las materias de las asignaturas de matemáticas y física de una manera extraordinariamente estimulante». También tuvo el acierto de instruirle sobre algunos de los instrumentos que usaban los investigadores en el laboratorio. En 1901, Meitner realizó el examen de acceso junto a otras catorce mujeres, entre las que se encontraba también la hija de Boltzmann —físico que posteriormente influyó enormemente en su carrera—, pero solo cuatro lograron aprobar. A pesar de que su gran pasión era la física, en el momento de la matriculación tuvo un principio de duda. Meitner tenía una gran inclinación por ayudar a los demás, lo que la hizo vacilar en el instante crucial de elegir los estudios:

> Cuando tenía veintitrés años y estaba a punto de entrar en la universidad, me entretuve con la idea de escoger medicina por su utilidad social, y dedicarme a las matemáticas y a la física en el tiempo sobrante.

Esta indecisión fue superada de inmediato por su padre, que le aconsejó que no se desviara de su objetivo inicial:

> Mi padre me dejó claro que esto solo sería posible para un genio como Hermann Helholtz, pero no para otra persona.

Meitner siempre valoraría la ponderación de los consejos de su padre, de modo que optó por estudiar física.

Meitner comenzó sus estudios en la Universidad de Viena en 1901, siendo un poco mayor que el resto de estudiantes, y era además una de las pocas mujeres. Al no haber cursado la misma enseñanza secundaria que el resto de universitarios, siempre se sintió insegura: estaba convencida de que había vacíos en su formación y esa sensación la empujó a matricularse en un gran número de asignaturas.

EL CAMINO DE LA FÍSICA

El carácter introvertido de Meitner provocó que empezara con una mala experiencia con las matemáticas, lo que la decantó definitivamente por el estudio de la física. Cuando su profesor de Cálculo le pidió que detectara un error en un texto matemático, ella misma reconoció:

> Necesité considerablemente su asistencia antes de encontrar el error, y cuando muy amablemente sugirió que me podría interesar publicar este trabajo con mi nombre, sentí que sería una decisión equivocada.

El profesor se molestó muchísimo con ella por este rechazo incomprensible, aunque Meitner simplemente había seguido su elevado sentido de la honestidad que siguió guiando sus decisiones toda su vida. Este episodio la ayudó también a disipar sus propias dudas:

> Este incidente me aclaró, sin embargo, que quería convertirme en una física, no en una matemática.

Meitner tuvo suerte de contar con profesores muy buenos, que le enseñaron, ya desde el primer momento, los descubrimientos más recientes que se iban realizando en el campo de la física. Franz Exner, uno de sus profesores de Física Experimental, era amigo de Wilhelm Röntgen, de modo que estaba al corriente de todos los descubrimientos relacionados con los rayos X. Este pro-

fesor también estaba muy interesado en la radiactividad y tenía relación directa con Marie y Pierre Curie, quienes le proveían de uranio para realizar sus propios experimentos.

DISPUTAS EN TORNO AL ATOMISMO

A partir del segundo año, Meitner tuvo como profesor a Ludwig Boltzmann, físico cuyas clases Meitner describía como las «más bellas y estimulantes». Boltzmann lograba transmitir un entusiasmo por la física tan contagioso que «abandonaba cada clase con la sensación de que se había revelado un mundo maravilloso y completamente nuevo». Se puede decir, por tanto, que su entrada a la física estuvo marcada decisivamente por uno de los científicos más importantes de todos los tiempos, una figura apasionada capaz de hacer vibrar a sus oyentes, aunque en el plano personal eso se tradujera también en un carácter muy inestable. Para Meitner, «era un profesor tan poderoso debido a su atípica humanidad».

> «Boltzmann le dio [a Lise Meitner] la visión de la física como una batalla por la verdad última, una visión que no perdió nunca.»
>
> — Otto Frisch.

Gracias a Boltzmann, Meitner tuvo ocasión de ser testimonio de uno de los debates intelectuales más intensos de la época, referido a la existencia de los átomos. Boltzmann se erigió como uno de los principales defensores del atomismo, mientras que la mayoría de físicos y químicos de la época había adoptado las tesis provenientes de la corriente filosófica conocida como «positivismo», según la cual los sentidos son la única fuente de conocimiento. Para el positivismo, un concepto solo tiene sentido si guarda correlación con una realidad empírica y concreta. De lo contrario, no puede considerarse que forme parte del conocimiento científico, sino que se trata de metafísica —lo que para los positivistas era sinónimo de discurso irreal y vacuo—. Esto precisamente es lo que ocurría con la noción de átomo hasta el siglo XIX: existían

indicios, pero no las sólidas pruebas experimentales que corroboraran su existencia. Los átomos eran entidades abstractas, y por ello, los positivistas catalogaban al atomismo como una concepción metafísica. Boltzmann, por el contrario, consideraba que era necesario afirmar la existencia de los átomos para explicar la realidad tal como la conocemos.

En 1900, Boltzmann estuvo impartiendo clases en Leipzig, y tuvo que enfrentarse a unas duras críticas que lo dejaron agotado. En 1902 retornó a Viena junto a su familia, donde pudo recuperar fuerzas para volver a la universidad de su ciudad natal. Meitner pudo asistir a la clase inaugural de Boltzmann, y dejó constancia de las impresiones que le produjo:

LUDWIG EDUARD BOLTZMANN



Boltzmann (1844-1906) es una de las figuras clave de la historia de la física. Sus contribuciones a la ciencia se centraron principalmente en la mecánica estadística, rama de la física que estudia cuestiones termodinámicas de sistemas compuestos por un gran número de partículas. Estudió física en la Universidad de Viena y se doctoró en 1866 con un trabajo sobre la teoría cinética de los gases. Tres años más tarde fue nombrado profesor de Física Matemática en la Universidad de Graz, y seguidamente también impartió clases en Múnich y en Leipzig. En 1872 coincidió con Henriette von Aigentler, que había solicitado su ingreso para estudiar física y matemáticas en la Universidad de Graz, solicitud que fue rechazada. Boltzmann la apoyó para que apelara la denegación de plaza hasta que excepcionalmente fue admitida. Tras una profusa correspondencia que duró cuatro años, contrajeron matrimonio y tuvieron cinco hijos. Boltzmann se convirtió desde ese momento en un firme defensor de que las mujeres pudieran acceder a los estudios universitarios. En 1873 retornó a Viena como profesor de Matemáticas, cargo que ocupó durante tres años. En

Nos explicó las grandes dificultades y la oposición con las que se había encontrado debido a su convicción de la existencia de los átomos, y de qué manera se le había atacado desde puntos de vista filosóficos, sin que fuera capaz de entender en todo momento qué era lo que los filósofos tenían contra él.

«Soy consciente de ser solo una persona que lucha débilmente contra la corriente del tiempo.»

— Ludwig Boltzmann.

En 1905, Meitner emprendió el trabajo de investigación que le permitiría lograr el título de doctora, bajo la dirección de

1876, Boltzmann regresó de nuevo a Graz para iniciar la etapa más fructífera de su vida en términos de investigación. Entre sus alumnos tuvo, por ejemplo, al científico sueco Svante Arrhenius (1859-1927), y llegó a ser nombrado presidente de la universidad. En este período, que se prolongó catorce años, desarrolló buena parte de sus teorías. En 1890 se le ofreció una cátedra en la Universidad de Viena, por lo que regresó a su ciudad natal, donde había estado también impartiendo clase uno de los principales opositores al atomismo, el influyente físico austriaco Ernst Mach (1838-1916). Tras un tiempo en la Universidad de Leipzig, regresó de nuevo a Viena, donde tuvo como alumnos a Lise Meitner y a Paul Ehrenfest (1880-1933), entre otros. Boltzmann se suicidó en Duino, Italia. Aunque a menudo algunos apuntan que fue la gran oposición a su teoría atomista la que le condujo a las crisis nerviosas y el desenlace fatal, otros, como Meitner, conocían su carácter, sus repentinos cambios de humor y una cierta tendencia a la depresión. Meitner no dudó en calificar su suicidio como fruto de su «inestabilidad mental». Tras su muerte, Meitner aseguró:

> Pudo haber sufrido numerosas heridas por cosas que una persona más robusta apenas habría percibido.

Por los rasgos que se conocen de su carácter, hoy se cree que Boltzmann era maniaco-depresivo. «Boltzmann no tenía inhibiciones para mostrar su entusiasmo cuando hablaba, lo que arrastraba a los oyentes», aseguraba Meitner. Con los estudiantes también tenía un contacto muy personal y Meitner tuvo ocasión de compartir numerosas veladas en su casa junto a otros estudiantes, donde Boltzmann tocaba el piano y les relataba anécdotas.

Franz Exner. La física austriaca estudió la conducción de calor en sólidos no homogéneos, un tema que guardaba relación con lo aprendido en las clases de Boltzmann. Asimismo, Meitner trató de aplicar las leyes de Maxwell para explicar la conducción del calor, y complementó sus razonamientos con pruebas experimentales. Como reconocimiento a su ardua tarea, recibió los máximos honores por este trabajo, de modo que en 1906 ya se había doctorado.

LA CONTROVERSIA DEL ATOMISMO

Boltzmann se convirtió en un férreo defensor del atomismo a partir de 1872. Para él, los átomos eran entidades reales y objetivas, mientras que sus oponentes consideraban que los átomos no podían verse y no existía ningún experimento físico directo que indicara su existencia. Eran entidades supuestas, cuya existencia se infería de forma indirecta, como ocurre con otras entidades metafísicas, y por ese motivo se oponían a que el atomismo fuera considerado como una teoría científica. Para Boltzmann, si se prescindía de los átomos, era imposible explicar cómo se materializa «la realidad tal como la conocemos». Uno de los más destacados positivistas del siglo XIX fue el químico alemán Wilhelm Ostwald (1853-1909), quien en una conferencia respondió a Boltzmann asegurando que el objetivo de la ciencia no es la representación de la realidad:

> ¡No se debe hacer ni una imagen ni una aproximación verosímil! Nuestra tarea no es mirar el mundo en un espejo más o menos distorsionado o borroso, sino verlo de forma tan inmediata como la naturaleza de nuestra mente nos lo permita. [...] Esta tarea no puede cumplirse hipostasiando [es decir, considerándolo como un sustrato real] alguna representación hipotética, sino solo probando relaciones de mutua interdependencia entre cantidades mesurables.

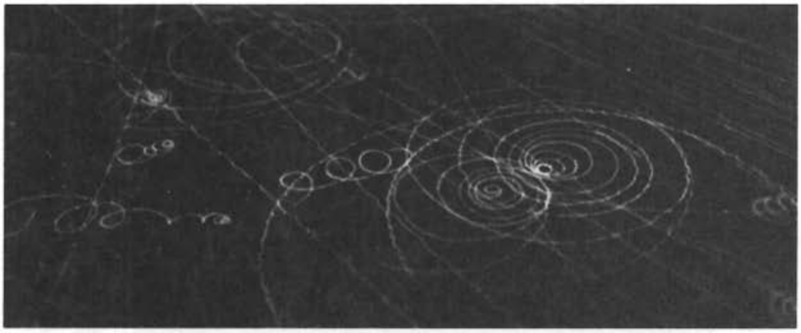
En 1890, Boltzmann y Ostwald coincidieron en una conferencia que tuvo lugar en Halle. En un descanso, ambos científicos se enzarzaron de nuevo en una discusión sobre la existencia de los átomos. Ostwald quiso convencerle sobre las bondades de la doctrina energética —que pretendía explicar todos los fenómenos naturales basándose en la noción de energía—, concepción desarrollada por él mismo y que aspiraba a rivalizar con el atomismo. En ese punto, Boltzmann repuso:

> No veo ninguna razón por la que no debiera considerarse que la energía esté también dividida atómicamente.

En uno de sus escritos autobiográficos, Meitner guarda un grato recuerdo del momento en que Paul Ehrenfest contactó con ella para profundizar en la teoría de Boltzmann y de lord Rayleigh:

> Me encontré por primera vez con Ehrenfest en mis días de estudiante en Viena. Vino desde Gotinga a Viena con el propósito de estudiar junto a Boltzmann. [...] Alguien le explicó que yo había tomado nota cuidadosamente de todas las clases de Boltzmann.

Se da la coincidencia de que Max Planck se encontraba escuchando esta conversación, y posiblemente influyera en su concepción de los cuantos de energía que desarrollaría años más tarde. Respecto a la controversia atómica, uno de los argumentos que los positivistas esgrimían con sarcasmo se refería al hecho de que nadie había podido ver los átomos. Tal como señala el historiador Gerald Holton, este argumento quedó anulado definitivamente cuando C.T.R. Wilson ideó la cámara de niebla, un recipiente sellado de cristal que contenía aire saturado de vapor de agua a muy baja temperatura. Cuando una única partícula ionizante, como por ejemplo una partícula alfa, penetraba en la cámara, el vapor de agua se condensaba a su paso, de modo que al final acababa dejando tras de sí una estela de niebla, como el rastro de condensación que forma un avión en el cielo. Era una forma de visualizar partículas, lo que zanjó definitivamente el escepticismo sobre los átomos. Con este instrumento se detectarían gran parte de las partículas elementales, como el neutrino, en 1936.



En la cámara de niebla, las partículas dejan un rastro correspondiente a su trayectoria, la cual viene principalmente dada por su interacción con los campos electromagnéticos.

Meitner encontró que la propuesta de estudiar las ideas de Rayleigh y de Boltzmann junto a Ehrenfest era muy interesante, de modo que aceptó de inmediato. Para Meitner, «Ehrenfest estaba mucho mejor preparado para resolver problemas teóricos que yo misma y además era un profesor excelente y estimulante». Esta colaboración junto a Ehrenfest, quien destacaría posteriormente por sus contribuciones a la física estadística y a la mecánica cuántica, resultó muy gratificante y obtuvieron algunos resultados que animaron a Meitner a continuar su carrera investigadora.

LOS INICIOS EN LA INVESTIGACIÓN

El camino más habitual para los doctores que continuaban o querían proseguir una carrera en investigación científica era entrar a formar parte de una universidad como asistente de algún profesor. Era una de las posiciones de menor categoría, y, por tanto, relativamente accesible, pero ni aun así existía precedente de que una mujer hubiera ocupado este cargo. Era de hecho la segunda mujer en lograr el doctorado en su universidad. Meitner no logró ninguna de esas plazas, pero tenía muy claro que quería dedicarse a la investigación. Por esa razón, decidió buscar el apoyo de Marie Curie. Su solicitud de trabajar junto a ella, sin embargo, se encontró con una respuesta negativa, dado que no había ninguna plaza libre en su laboratorio.

Aconsejada de nuevo por sus padres, que la urgían a que se pudiera mantener económicamente de forma independiente, Meitner optó por convertirse en profesora de una escuela femenina. Se lo planteó como una solución provisional, ya que su vocación seguía siendo la investigación. Por esta razón, decidió que por las tardes seguiría investigando en el Instituto de Física Teórica, el laboratorio que había dirigido Boltzmann hasta su repentino fallecimiento. Más que un instituto dedicado a la investigación, Meitner lo describía como algo más parecido a un gallinero.

Stefan Meyer, que había sido asistente de Boltzmann, pasó a dirigir dicho instituto. Su principal interés era el estudio de la radiactividad, y por esta razón uno de los primeros experimen-





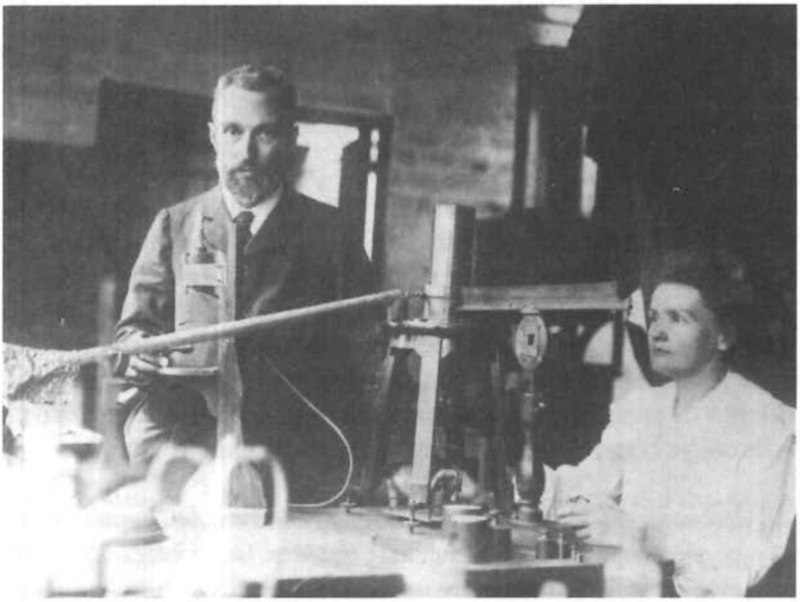


FOTO SUPERIOR IZQUIERDA:
Antoine-Henri Becquerel en su laboratorio, en el que realizaba experimentos relacionados con el campo magnético.

FOTO SUPERIOR DERECHA:
Lise Meitner en 1906.

FOTO INFERIOR:
Pierre y Marie Curie en su laboratorio de París en 1906. Esta ilustre pareja de científicos destacó por sus estudios en el campo de la radiactividad.

tos que acometió Meitner consistió en observar cómo diferentes metales absorbían las radiaciones alfa y beta. Meitner no obtuvo ningún resultado novedoso en esta primera incursión en la investigación de la radiactividad, pero su estudio le sirvió para familiarizarse con algunas técnicas de caracterización que le resultarían imprescindibles, como es el caso del electroscopio.

La radiactividad atraía a todos los jóvenes investigadores, que intuían que con dedicación podían realizar algún hallazgo decisivo. Por ejemplo, no cesaban de descubrirse nuevos elementos radiactivos. El primero en hallarse fue el uranio, en 1896, y apenas cuatro años más tarde se le sumaron el polonio, el radio, el torio y el actinio. El número de nuevos elementos fue creciendo descontroladamente, sobre todo debido a que no existía aún la noción de isótopo. Esto llevaba a considerar a los investigadores que toda actividad diferente que detectaban era debida a elementos distintos.

Meyer había realizado una importante contribución al campo de la radiactividad al demostrar que la radiación beta consistía en electrones —descubrimiento simultáneo a Henri Becquerel y Friedrich Giesel—. También trataron de determinar la carga eléctrica de las partículas alfa, pero esto solo lo pudo determinar Rutherford, en 1906, haciendo uso de unos potentes campos magnéticos.

DISPERSIÓN DE RAYOS ALFA

A finales de 1906, Meitner decidió emprender otra investigación sobre la radiactividad. Se sabía que las partículas alfa tenían un escaso poder de penetración en la materia, pero quedaba por averiguar si se dispersaban —tal como defendía Rutherford—, o bien la materia las absorbía. Si se dispersaban, eso significaba, según Rutherford, que «los átomos de la materia tenían que ser el asiento de fuerzas eléctricas muy intensas». Meitner manifestó ya en su vejez cómo llegó a involucrarse en este tema:

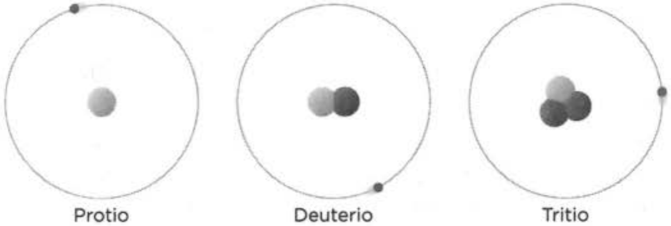
> Recuerdo haber trabajado en radiactividad en Viena sobre la dispersión de rayos alfa en ángulos pequeños. La investigación emergió por una discusión entre un físico de Praga y otro de Berlín [...]

LOS ISÓTOPOS

Los isótopos son variaciones de un mismo elemento, ya que pueden estar constituidos por un número variable de neutrones en el núcleo atómico. Para los físicos que estudiaban la radiactividad, no haber comprendido todavía la estructura interna del átomo les llevó a pensar que existían más elementos de los que en realidad había, dado que consideraban que cada sustancia con una masa atómica diferente encontrada se correspondía con un nuevo elemento. En 1910, Frederick Soddy observó que «elementos de pesos atómicos diferentes [lo que en la actualidad se denomina "masa atómica"] pueden poseer propiedades idénticas», lo que se corresponde con una misma posición de la tabla periódica. Esto pudo corroborarlo cuando comparó las masas atómicas del plomo obtenido por la serie de desintegraciones nucleares procedente del uranio, con el plomo que se obtenía como resultado final de la serie del torio. El hecho de que sus masas fueran distintas corroboraba su tesis. El desarrollo de técnicas e instrumentos como el espectrómetro de masas —que permite separar núcleos atómicos en función de su relación masa-carga— sirvió para identificar que lo que parecían nuevas sustancias eran en realidad isótopos de un mismo elemento.

La aportación de Chadwick

Gracias al descubrimiento del neutrón en 1932 por James Chadwick, se logró basar la existencia de los isótopos en la variación de la estructura nuclear. La posibilidad de un número variable de neutrones en el núcleo atómico explicaba que hubiera variedades en la masa de un mismo elemento, que se caracteriza por el número de protones, los isótopos de un elemento. El ejemplo más sencillo de isótopos presentes en la naturaleza se refiere al elemento hidrógeno. El hidrógeno es el elemento simple y se caracteriza por estar constituido por un solo protón en su núcleo. Si no tiene neutrones, forma un isótopo llamado protio; cuando se le añade un neutrón forma el deuterio; y con dos neutrones constituye el tritio (véase la figura).



El núcleo del protio está constituido exclusivamente por un protón. En el deuterio, además del protón hay un neutrón. En el tritio, el núcleo lo componen tres partículas: el protón y dos neutrones.

Uno mantenía que no había dispersión en ángulos pequeños, y el otro afirmó que sí. Entonces consideré que se podía probar experimentalmente, y así lo hice en el instituto de Stefan Meyer. Los vieneses estaban de hecho muy interesados en este proyecto. Meyer y Schweidler habían hecho un gran trabajo en radiactividad.

Su sistema experimental para comprobar si los rayos se dispersaban consistía en lanzar un haz de partículas alfa que se hacía pasar por una matriz de minúsculos tubos metálicos dispuestos en paralelo. Su finalidad era que los rayos alfa colimaran, es decir, que se alinearan según el eje de los tubos metálicos. Posteriormente, el haz alfa se hacía pasar por una lámina metálica, y de

EL ELECTROSCOPIO

El electroscopio (figura 1) es un detector de cargas eléctricas. Consiste en dos hojas metálicas, usualmente de oro o aluminio, sujetas a una varilla de metal. Este dispositivo se colocaba aislado en el interior de un recipiente de vidrio o metal. La varilla sobresalía por uno de los lados, de modo que cuando se aplicaba un cuerpo cargado con electricidad, las dos hojas se cargaban y la fuerza electrostática hacía que se repelieran mutuamente. De esta manera, se podía comprobar si un objeto estaba cargado eléctricamente. El primer electroscopio lo construyó William Gilbert (1544-1603), un físico inglés pionero en el estudio de los imanes. Las láminas del electroscopio acababan volviendo lentamente a su posición original. Esto significaba que se descarga-

FIG. 1

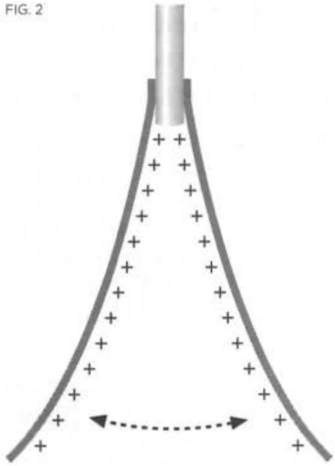


nuevo se hacía colimar el haz al pasar por otro conjunto de tubos. Al variar la distancia entre los dos colimadores, la atenuación era variable, lo que parecía indicar que los rayos alfa realmente se dispersaban al penetrar la lámina. Otro resultado que arrojó el experimento de Meitner fue la determinación de que en función de la masa atómica de la lámina de metal, también variaba la magnitud de la dispersión: cuanto mayor era la masa atómica de los átomos de metal, mayor dispersión.

Meitner publicó en 1907 el resultado de este experimento en la revista alemana *Physikalische Zeitschrift*, una de las publicaciones científicas más prestigiosas del momento, lo que dio salida a su carrera científica.

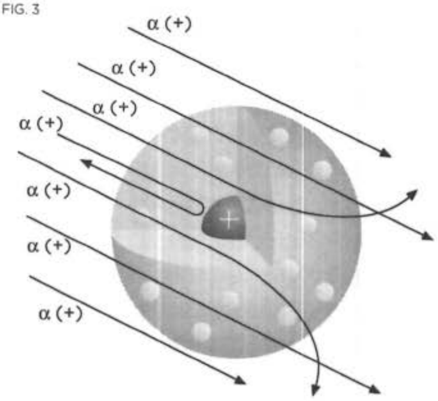
ban, a pesar de que el dispositivo interior estuviera aislado eléctricamente. Pronto se llegó a la conclusión de que debido a que el aire está levemente ionizado, es capaz de conducir la corriente desde las láminas de metal hasta las paredes del electroscopio. Sin embargo, la duda entonces se encontraba en adivinar por qué se ionizaba el aire. En 1900, Charles Wilson (1869-1959), el físico escocés que recibió el premio Nobel de Física en 1927 por desarrollar la cámara de niebla, logró determinar que la ionización del aire estaba causada por la radiación natural. La radiación natural se encuentra en todas partes e ioniza ligeramente el aire. Por esta razón, en los electroscopios se observa que las láminas cargadas vuelven a su posición original de manera progresiva (figura 2). Con la proximidad de sustancias radiactivas, este proceso se acelera, y cuanto mayor es la intensidad de la radiactividad, más rápidamente tiene lugar este descenso. De este modo, el electroscopio se convirtió en un instrumento para medir la radiación de fondo de los materiales radiactivos.

FIG. 2



Vista lateral de las hojas de un electroscopio. Las láminas conductoras, u hojas, con cargas eléctricas del mismo signo se repelen mutuamente.

FIG. 3



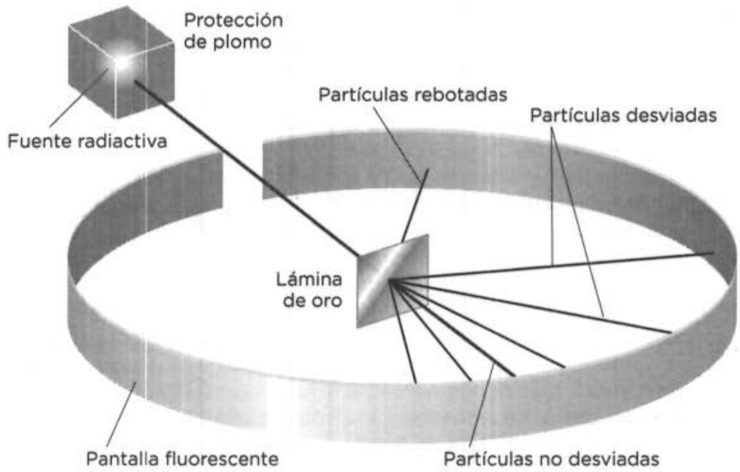
EL DESCUBRIMIENTO DEL NÚCLEO

Meitner no especuló sobre qué podía provocar la dispersión de las partículas alfa. Para Rutherford, sin embargo, ese aspecto constituyó una obsesión que le condujo al excepcional descubrimiento del núcleo atómico, en 1911. Tomando una finísima lámina de metal, que bombardeó con partículas alfa, pronosticó que si el modelo atómico vigente basado en las ideas de Thomson era cierto, las partículas incidentes no debían desviarse. Según Thomson, el átomo se componía de partículas de carga negativa que flotaban en una nube cargada positivamente. Los electrones no eran suficientemente grandes como para provocar el desvío de los rayos alfa respecto de su trayectoria lineal, ni en cantidades significativas. Sin embargo, cuando

FIGURA 3: **Rutherford propuso un nuevo modelo atómico cuya principal novedad era situar el núcleo —un punto concentrado de masa y carga eléctrica positiva— en el centro del átomo. De esta manera podía explicar por qué una mínima parte de las partículas alfa que lanzaba sobre la superficie metálica rebotaban.**

FIGURA 4: **El experimento que permitió a Rutherford descubrir el núcleo atómico consistía en lanzar partículas alfa sobre una fina lámina de oro.**

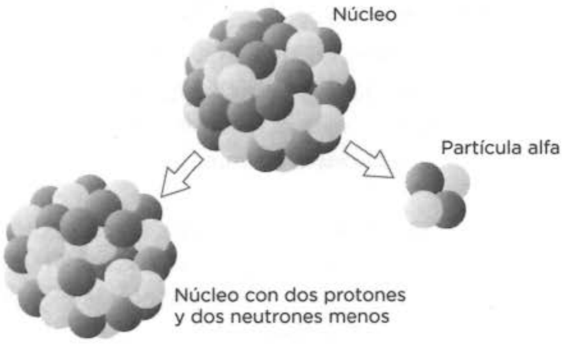
FIG. 4



LA DESINTEGRACIÓN ALFA

Ernest Rutherford está considerado el padre de la física nuclear. En 1902, Rutherford descubrió que la radiactividad procedía de los propios átomos. Junto a Frederick Soddy, llegó a la conclusión de que «la radiactividad es un fenómeno atómico con el acompañamiento de un cambio químico en el cual se producen nuevos tipos de materia». Es decir, los átomos radiactivos se desintegraban y la radiación emitida era el resultado de esa descomposición atómica capaz de desintegrar el átomo de forma espontánea. Hasta 1911 no se pudo comprender que esta desintegración solo afectaba al núcleo atómico. Los rayos alfa tenían que ser partículas desprendidas del átomo, de manera que, al ser emitidas, transformaban la naturaleza misma de dicho átomo: al emitirse una partícula alfa, un elemento, como el uranio, se convertía en otro elemento, como el torio. La desintegración alfa (véase la figura) consiste en la emisión de una partícula, formada por dos protones y dos neutrones —idéntica, por tanto, al núcleo totalmente ionizado de helio— que se desprende del núcleo atómico. Se produce de forma espontánea en los núcleos con un gran número de protones y neutrones que son energéticamente inestables; dicho de otro modo, debido a intensas fuerzas de repulsión nucleares, tal como ocurre con el elemento uranio.

La transmutación química de un elemento tras una emisión tipo alfa consiste en la variación del número de partículas nucleares y la proporción de neutrones y protones en el núcleo, correspondiente a la pérdida de dos protones y dos neutrones.



en un experimento diseñado por Marsden y Geiger (figura 3) se registró claramente la dispersión, Rutherford concluyó que «teniendo en cuenta la evidencia en su conjunto, lo más simple es suponer que el átomo contiene una carga central distribuida en un volumen muy pequeño»; había descubierto el núcleo atómico (figura 4).

EL ENCUENTRO CON PLANCK

Tras la muerte de Boltzmann —en septiembre de 1906—, era necesario encontrar un sucesor para ocupar su plaza en la Universidad de Viena Los administradores universitarios decidieron proponer a Max Planck, y por esa razón lo invitaron a que conociera la universidad. Planck gozaba de una buena posición en Berlín, donde ocupaba una cátedra de Física Teórica, y no pensaba cambiarla. Pero se decidió a viajar hasta Viena como un acto de homenaje póstumo hacia Boltzmann. Gracias a este viaje, Meitner tuvo la ocasión de conocer a Planck.

En realidad, Meitner no estaba al corriente del trabajo de Planck y su revolucionaria propuesta de la cuantificación de la energía. Así recordó ella esa situación:

> A menudo me he preguntado la razón por la que Boltzmann nunca dijo ni una palabra [sobre la teoría cuántica de Max Planck]. Después de todo, yo atendí a sus clases cinco años después de su descubrimiento. Sin embargo, tuvo que transcurrir un largo período de tiempo hasta que la teoría cuántica fuera generalmente aceptada. Pero aun así, Planck no habría llegado a desarrollar esta teoría si no hubiera aceptado la teoría atómica de Boltzmann, así como el uso de la estadística tal como la había introducido Boltzmann.

La visita, en todo caso, fue un auténtico revulsivo para Meitner, por lo que decidió dejar atrás Viena para ir a vivir a Berlín, y así estudiar junto a Planck, con la esperanza de que se le abrieran nuevos horizontes.

CAPÍTULO 3

El descubrimiento de elementos radiactivos

El descubrimiento del protactinio, un elemento muy radiactivo, fue uno de los logros más notables alcanzados por Lise Meitner junto con Otto Hahn en Berlín. Esta pareja de científicos conformó uno de los equipos de investigación en torno a la radiactividad más destacados de la época.

En 1907, Max Planck era ya una figura respetada. A medida que sus ideas fueron calando, aumentaba el número de jóvenes investigadores —entre los que se encontraba Meitner— deseosos de atender a sus clases en la Universidad de Berlín. Planck se convirtió en mentor de Meitner, aunque su carácter era diametralmente opuesto al de Boltzmann. Planck era serio, adusto, reservado y parco, todo lo contrario al entusiasmo característico de Boltzmann, que contagiaba a sus alumnos. En palabras de Meitner:

> Tengo que admitir que al principio estaba un poco decepcionada con las clases de Planck, a pesar de que eran de una clásica claridad. [...] Pero algunas veces producían una impresión descolorida en comparación con las de Boltzmann.

Planck no se oponía a la presencia de mujeres en la universidad, aunque consideraba que ocurría de forma excepcional que una mujer tuviera la capacidad y el interés para dedicarse a la física teórica. Esos prejuicios respecto a las mujeres pudieron influir en un principio en la manera en que recibió a Meitner. Así relató ella misma estos primeros encuentros:

> Cuando me registré en la Universidad de Berlín para atender a las clases de Planck, me recibió muy amablemente y muy poco después

me invitó a su casa. La primera vez que le visité allí, me dijo: «¡Pero si ya tienes el doctorado! ¿Qué más puedes desear?», a lo que repliqué que quería alcanzar un entendimiento real de la física. Me respondió con unas pocas palabras amistosas y no profundizó más en el asunto. Concluí que no debía de tener una opinión muy elevada de las mujeres dedicadas a la ciencia, y supongo que posiblemente eso era verdad hasta cierto punto en esa época.

Con el paso del tiempo, el aprecio entre Planck y Meitner creció. Planck se convirtió en un pilar fundamental en su carrera y siempre trató de que se reconociera su trabajo como merecía, hasta el punto de proponerla en numerosas ocasiones como candidata al premio Nobel. Meitner, a su vez, destacaba la «pureza de carácter» de Planck y el respeto hacia el físico fue en aumento. Llegó incluso a hacerse amiga íntima de sus dos hijas gemelas.

«En física no trabajamos para el día, ni para el éxito momentáneo, sino para la eternidad.»

— Max Planck.

Meitner tenía planeado no permanecer más de dos años en Berlín, así que era necesario aprovechar el tiempo. En primer lugar, trató de conseguir un espacio para establecer su propio laboratorio y así poder proseguir con sus estudios sobre radiactividad. Por este motivo se reunió con Heinrich Rubens, el director de Física Experimental de la universidad. «No había lugar para mí», fue la conclusión del encuentro. Rubens solo le pudo ofrecer la posibilidad de trabajar en su laboratorio y bajo sus órdenes, pero a Meitner este ofrecimiento no le entusiasmó. Tenía ya un trabajo publicado, y sabía que le convenía más dar continuidad a sus investigaciones sobre radiactividad.

Sin embargo, el propio Rubens le habló de un joven químico que tenía intereses parecidos a los suyos y que de hecho había expresado su intención de conocerla. Al poco rato, Meitner se encontró con él, Otto Hahn.

MAX PLANCK



Max Planck en 1901.

Max Karl Ernst Ludwig Planck nació en Kiel (Alemania) en 1858. Durante su niñez, la familia se trasladó a Múnich. Estudió física en la Universidad de Múnich y se doctoró en 1879 —cuando solo tenía veintiún años— con un trabajo sobre el segundo principio de la termodinámica. Fue profesor asociado en la Universidad de Kiel. Cuando en 1887 murió Gustav Kirchhoff, eminente profesor de la Universidad de Berlín, en primer lugar se le ofreció el puesto a Boltzmann, que lo rechazó — quien más tarde lamentaría haberlo rechazado—, y finalmente se le concedió a Planck. Para Planck constituyó un gran honor, entre otras cosas porque iba a coincidir con Helmholtz, una de las leyendas de la física del siglo XIX. Allí permaneció el resto de su carrera. El 14 de diciembre de 1900, Max Planck presentó en la Academia de Ciencias de Prusia unas incómodas conclusiones, fruto de sus investigaciones sobre el intercambio energético de la materia. Para Planck, la única manera de conciliar los resultados empíricos con las teorías sobre la radiación, era asumir que la energía se presentaba en forma de paquetes, a los que llamó «cuantos de energía». Se trató de un «acto de desesperación» —así lo describió el propio Planck—, porque suponía quebrantar las leyes sobre la radiación electromagnética concebidas por Maxwell a mediados del siglo XIX. Ni el propio Planck estaba convencido de su propuesta. En un principio, el físico alemán pensaba que su solución no era más que un planteamiento de tipo formal y que un mayor empeño y dedicación en ese estudio le permitirían llegar al modelo correcto, integrado en el conocimiento de la física de su tiempo. En realidad, Planck no creía en la existencia de los cuantos. Sería necesario esperar hasta el año 1905 para que Albert Einstein confirmara el acierto de la existencia de los paquetes de energía al usarlos para explicar el efecto fotoeléctrico. El trabajo posterior del físico danés Niels Bohr basándose en la cuantificación de la energía para explicar las líneas espectrales de absorción características de cada sustancia y el enunciado de un nuevo modelo atómico, terminó de dar robustez a la teoría de los cuantos de energía.

HAHN, ANTES DE CONOCER A MEITNER

Otto Hahn había nacido en Fránkfurt (Alemania) en 1879. Era el menor de tres hermanos de una familia de orígenes humildes, pero como los negocios paternos prosperaron positivamente, pudieron vivir holgadamente. Tal como explica en su autobiografía, el padre de Otto Hahn pretendía que este cursara estudios de arquitectura, a pesar de que Otto no se sentía apto para ello:

> No tenía ningún talento para dibujar. [...] No poseía ninguna imaginación artística, y en conjunto no estaba en ningún caso adaptado para la profesión.

Durante la adolescencia, Hahn acostumbraba a convertir el lavabo de su casa en un laboratorio químico improvisado y esos escarceos juveniles con la experimentación le convencieron de que tenía que dedicarse a la química.

En 1897 ingresó en la Universidad de Marburgo, y, como reconoció él mismo, «nuestra atención por la ciencia no destacaba en demasía». Hahn no tenía mayores pretensiones intelectuales ni ninguna otra ansia que la de divertirse:

> No tenía intención de convertirme en científico y asumí que un trabajo en la industria solo requería aprender lo fundamental.

Tenía claro que al acabar sus estudios encontraría trabajo en la cada vez más boyante industria química alemana, y por este motivo pasó buena parte de la época universitaria en tabernas, fumando, bebiendo y pasando el rato con los amigos, «sin preocupaciones y con muchas horas felices», si bien obtendría las máximas calificaciones en las asignaturas más directamente relacionadas con la química.

Una vez terminados los estudios hizo el servicio militar obligatorio y posteriormente fue nombrado asistente de uno de los profesores de la Universidad de Marburgo. Para lograr un trabajo en la industria se le exigía que tuviera experiencia en el extranjero y que dominara otras lenguas. Hahn creyó entonces que una

buena opción era ampliar sus estudios en Londres. El plan era simple, pero no salió como esperaba.

En 1904 viajó a Londres para trabajar junto al químico escocés William Ramsay (1852-1916), un experto en gases nobles y descubridor entre otros del gas helio, cuyas investigaciones en ese campo le reportarían el Nobel de Química ese mismo año. Ramsay se había volcado en el estudio de la radiactividad y estaba en el momento álgido de su carrera, aunque pocos años después esta se vería truncada al involucrarse en un proyecto para obtener oro a partir de agua de mar. Se trataba, en todo caso, de una gran oportunidad para Hahn, y no la desaprovechó.

«Hahn tiene instinto para descubrir nuevos elementos.»

— Ernest Rutherford.

«Ese año me "transmuté" de químico orgánico en radioquímico», explicaría Hahn. Sus conocimientos eran escasos en el estudio de la radiactividad y no contaba con ninguna experiencia. Ramsay pensaba, sin embargo, que esta falta de conocimientos podía ser una ventaja dado que su investigación estaría libre de prejuicios. En poco tiempo, sus estudios con el radio —el elemento descubierto por los Curie a principios de siglo— le llevaron a concluir que había detectado un nuevo elemento radiactivo. Lo llamó radiotorio, por estar emparentado con el torio. Ramsay se dio cuenta de que Hahn tenía las destrezas y habilidades en el laboratorio que le podían proporcionar una brillante carrera en la investigación, por lo que le instó a que prosiguiera sus estudios en una rama tan prometedora como era la radiactividad. Más tarde, el propio Hahn reconoció algo sorprendente:

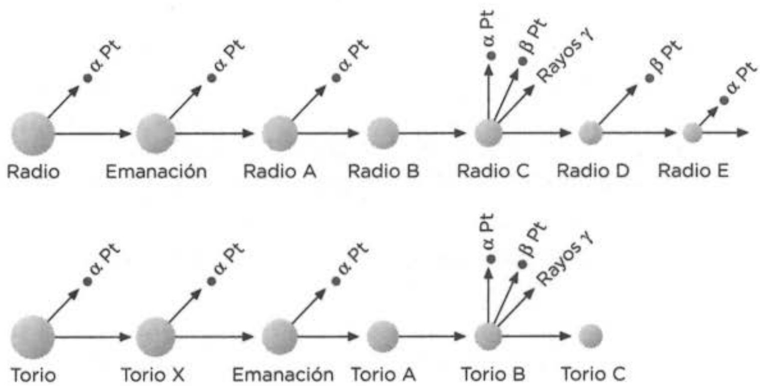
> ¿Cómo vino a parar esta sustancia [el radiotorio] a la muestra de radio? La explicación es que la muestra no se extrajo de una veta de uranio puro, sino de una veta llamada torianita, que existe en Ceilán [hoy Sri-Lanka] y que contiene, además de uranio, un alto porcentaje de torio. Hablando estrictamente, el descubrimiento del radiotorio fue solo un asunto de suerte.

La estancia en Londres llegaba a su fin. La empresa química para la que había postulado, en una de las industrias más sólidas y con más futuro del país, lo estaba esperando con un puesto de trabajo estable y bien remunerado. Pero Ramsay lo había introducido en un nuevo mundo en el que se sabía desenvolver con habilidad. Trabajar en investigación se presentaba como una opción más incierta e inestable, pero también más atractiva y estimulante. Ramsay, por su parte, le aconsejó que para seguir progre-

RADIOTORIO, RADIOACTINIO, MESOTORIO Y SERIES RADIACTIVAS

Mientras que en el año 1900 apenas se conocía un número reducido de elementos radiactivos, rápidamente se empezaron a realizar nuevos descubrimientos. La identificación de elementos radiactivos se producía de forma un tanto descontrolada y caótica. Al conjunto de elementos radiactivos pasó a llamárseles «radioelementos». Sin embargo, Ernest Rutherford observó que los elementos radiactivos a raíz de la desintegración emitían radiaciones (alfa, beta y gamma), y eso acarreaba que en ciertos casos se transmutaran en otro elemento, que habitualmente también era radiactivo. La transmutación química y la emisión de radiación eran dos fenómenos que se encontraban ligados: las partículas emitidas durante la radiación eran clave para entender la transformación que sufrían los elementos. En el proceso radiactivo se desprendían partículas que modificaban el contenido en masa del átomo del elemento, y por eso pasaban a ser sustancias distintas. Ernest Rutherford y Frederick Soddy llegaron a establecer que, en realidad, la variedad de elementos radiactivos se podían emparentar formando familias. Toda la variedad de elementos radiactivos se podía organizar mediante un esquema sencillo, como si se tratara de un árbol familiar, y formando lo que se llama «series de desintegración». Había un elemento, que era el «padre», que podía ser el uranio o el torio, y a partir de él —por sucesivas desintegraciones, y emisiones de radiación— resultaban las sustancias «hijas», o productos de desintegración. Los nuevos elementos descubiertos por Otto Hahn, por tanto, deberían poder ser ubicados entre las series radiactivas. En 1904, Rutherford publicó las primeras series de elementos que mostraban los vínculos entre los distintos elementos radiactivos formando familias. En la figura se puede observar la familia del radio y la del torio, con las sucesivas desintegraciones, explicitando las partículas que se desprendían en cada una de las desintegraciones (Pt era la abreviación empleada para referirse a partículas, en este caso, tipo alfa o tipo beta).

sando, era conveniente que viajara a Canadá, para trabajar junto al mayor experto en radiactividad del momento: Ernest Rutherford, que se encontraba en la Universidad McGill. Tenía que decidir entre retornar a su país de origen o bien solicitar a Rutherford que lo acogiera por un tiempo como ayudante de laboratorio. Aunque se decidió por esto último, eso no excluyó que posteriormente estableciera firmes contactos con la industria química para que le financiara parte de sus proyectos.



La noción de isótopo la introdujo Soddy en 1913 y contribuyó a reclasificar todos los radioelementos. Tal como observó el propio Hahn:

> Todos mis intentos para separar uno del otro los «elementos» radio y mesotorio fallaron. Era igual de difícil que separar el radiotorio del torio. El parecido químico entre las sustancias era evidentemente mayor que el que hay, por ejemplo, entre los elementos de las tierras raras; nadie aún había pensado, sin embargo, en la posible existencia de los isótopos.

Los distintos isótopos de un elemento tenían las mismas propiedades químicas, por lo que cierta confusión era comprensible. Sin embargo, al variar su peso atómico, parecía que tenía que encontrarse con un nuevo elemento. En el caso del mesotorio, descubierto por Hahn en 1907, posteriormente se supo que era un isótopo radiactivo del radio (en concreto, se trata de radio-228) como un producto de la desintegración del torio.

Otto Hahn estuvo un año y medio en la Universidad McGill junto a Ernest Rutherford. Inicialmente, este no tenía un gran concepto del hallazgo del radiotorio y tampoco confiaba en los métodos usados por William Ramsay —literalmente, escribió en una carta que Hahn tenía que «aprender física y desprenderse de su elemento»—. A pesar de ello, el ambiente de trabajo con el que se encontró Hahn en Canadá era muy estimulante y fue un período fértil que llegó a describir como memorable. Además, logró encontrar lo que parecía que era otro nuevo elemento, que llamó radioactinio. Entre Rutherford y Hahn se crearon unos lazos de amistad que perdurarían toda la vida.

Al regresar a Alemania, Hahn encontró trabajo en el Instituto de Química de Berlín. Esta ciudad alemana parecía ser la óptima para establecerse, dado que era donde se estaban concentrando las principales empresas dedicadas al sector químico. El propio director del instituto, Emil Fischer, una eminencia que había recibido el Nobel de Química en 1902 por sus estudios sobre la purina, fue quien se interesó por él.

La radiactividad era un campo que aún no recibía la suficiente atención de la Universidad, pero su siguiente descubrimiento, el mesotorio, que halló en 1907, gozó de un gran interés por parte de la industria. Químicamente era idéntico al radio, pero más barato de producir. El mesotorio mostraba muchas características interesantes y Hahn alcanzó por este descubrimiento una cierta notoriedad en su país. Más tarde se supo que estos tres elementos —el radiotorio, el radioactinio y el mesotorio— eran en realidad isótopos de elementos ya conocidos en la época.

EL ESTUDIO DE LA RADIACIÓN BETA

Meitner y Hahn se encontraron por primera vez en la Universidad de Berlín a finales de 1907. Desde el primer momento se entendieron a la perfección, de modo que Hahn planteó enseguida la posibilidad de que se incorporara al instituto de química donde él trabajaba. Sin embargo, antes era necesario solicitar permiso

a Fischer, su director. Este se mostró un tanto reacio, ya que las normas de la universidad prohibían la presencia de mujeres en el edificio, y él mismo sentía cierto reparo por tener que compartir el laboratorio con una mujer. Finalmente cedió a aceptarla en el instituto, pero solo si montaba el laboratorio en el sótano, en una sala donde anteriormente hubo una carpintería. Meitner tendría prohibido el acceso al edificio principal, e incluso si quería ir al lavabo tenía que dirigirse a un hotel en las proximidades. «Tuve que prometer que no entraría en el instituto de química donde trabajaban los estudiantes varones y donde Hahn realizaba sus experimentos químicos», relataría posteriormente.

> «En aquellos días no se permitía a las mujeres trabajar en el instituto. Cuando le planteé la colaboración a Emil Fischer, le otorgó un permiso a la señorita Meitner para que trabajase conmigo en la carpintería del sótano del instituto [...] le solicitó, sin embargo, que no entrase en los cuartos de estudio del piso superior, ya que sentaría un mal precedente.»
>
> — Otto Hahn.

Por las mañanas, Meitner asistía a las clases de la universidad como oyente, lo que seguía siendo su principal razón para estar en Berlín. Hahn, por su parte, tenía la misión de poner en marcha una sección de radioquímica en el instituto durante la jornada laboral. Las tardes, en cambio, quedaban a su completa disposición para experimentar.

La relación entre ambos siempre fue amigable, pero muy respetuosa —durante años se siguieron tratando de usted—, y no mantenían ningún contacto fuera del laboratorio, ni compartieron jamás una comida de trabajo. Sin embargo, Hahn tenía claro que eran «muy buenos amigos». Meitner, por su parte, siempre recordaría de esa época la «indestructible felicidad y serena disposición» de Hahn, así como «su amabilidad y pasión por la música». Hahn tenía una asombrosa memoria musical, y era capaz de ento-

nar silbando sinfonías completas de Beethoven o de Tchaikovsky mientras llevaban a cabo alguno de los laboriosos experimentos. Hahn era extrovertido y Meitner tímida, de modo que se podría decir que hasta en su carácter se complementaban.

EN EL SÓTANO

Su instrumental era sencillo: consistía en tres electroscopios cuyo principio de operación se inspiraba en los modelos que usaba Rutherford. Estos aparatos les iban a permitir medir y contabilizar las distintas radiaciones de los procesos radiactivos. Su primer gran objetivo consistió en estudiar la radiación beta, de modo que de forma sistemática analizaron este tipo de emisión para todos los elementos conocidos. Como fruto de este trabajo, en 1907 publicaron en la revista *Physikalische Zeitschrift* su primer artículo conjunto, titulado «Sobre la absorción de rayos beta de distintos radioelementos». Mientras que Hahn estaba volcado en hallar nuevos radioelementos, para Meitner lo más interesante era «desenredar las radiaciones». En los dos años siguientes publicarían hasta ocho artículos en la misma revista.

Al año siguiente, en 1908, Rutherford obtuvo el premio Nobel de Química por sus descubrimientos sobre radiactividad, de modo que se generalizó el interés por esta rama. Hahn y Meitner empezaron a notar que se les tomaba más en serio y aumentó la visibilidad de sus investigaciones y el reconocimiento entre los compañeros. Rutherford, que se desplazó hasta Estocolmo para recoger el premio, viajó previamente por Alemania, donde estuvo acompañado por su discípulo Hahn, y también tuvo ocasión de reunirse con Meitner, de cuyos logros ya había oído hablar.

El incesante trabajo de la pareja de científicos fue produciendo nuevos frutos, como el hallazgo en 1908 de un nuevo radioelemento llamado actinio C. Para lograr un mejor análisis de la radiación beta, dispusieron de un potente imán con el que desviar los haces de partículas y así realizar distintos tipos de mediciones sobre la carga eléctrica. Meitner ideó también en esa época el llamado «método del retroceso», considerado como una de sus principales

aportaciones. Cuando un átomo radiactivo emite una partícula alfa, provoca cierto retroceso del propio núcleo, de la misma manera que, al disparar con una escopeta, esta también sufre un retroceso.

> «¡Pero yo creía que usted era un hombre!»
>
> — Ernest Rutherford, cuando conoció personalmente a Lise Meitner.

Durante este período tan intenso en cuanto a investigación, Meitner también tuvo tiempo para trabar algunas amistades, principalmente entre el grupo de científicos, estudiantes e investigadores que se daban cita en casa de Max Planck. También conoció entonces a Eva von Bahr-Bergius, científica sueca que trabajaba junto al físico alemán Heinrich Rubens (1865-1922) —tal y como se ha relatado, Eva fue la amiga a la que iba a visitar cuando aconteció el revelador paseo por la nieve—. Meitner también asistía semanalmente a unos seminarios en los que se compartían experimentos, investigaciones y hallazgos entre científicos berlineses y entre cuyos asistentes se encontraban, por ejemplo, Planck o Einstein. Hahn y Meitner también tuvieron ocasión de presentar allí sus propios hallazgos. En estas ocasiones, Meitner pudo sentir el apoyo de sus colegas: «Los coloquios eran un centro excepcional de actividad intelectual». Se encontraba en el epicentro científico de la época.

Hahn solicitó en varias ocasiones a Rutherford que le enviara muestras de fuentes radiactivas para poder proseguir con sus experimentos. En una ocasión, el cartero se acercó a la antigua carpintería, y antes de que pudiera decir nada, Meitner se adelantó: «¡Oh! Me ha traído un paquete de Rutherford». El sorprendido cartero comprobó que, efectivamente, había un paquete con ese remitente. Se hicieron muchas bromas sobre los poderes psíquicos de Meitner, aunque tenían una sencilla explicación. Como en el paquete había sustancias radiactivas, el instrumental de su laboratorio había captado la presencia de la radiactividad, y por esa razón Meitner infirió quién enviaba la carta.

En 1909 se organizaron unas conferencias en Salzburgo —ciudad situada en los Alpes austriacos— centradas en la revolución

LA DESINTEGRACIÓN BETA

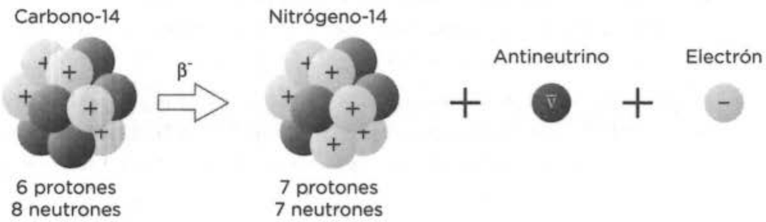
Meitner y Hahn centraron toda su atención en el estudio de la desintegración beta. Esta era conocida desde 1899, cuando Rutherford la pudo distinguir de la que denominó radiación alfa. Ese mismo año, Marie Curie ya sugirió que la radiación podía estar compuesta por partículas, pero era necesario probarlo. Para ello, se sometió la radiación beta a un campo magnético y así se comprobó si el campo alteraba la trayectoria de los rayos. En caso afirmativo, era un indicio de que tenía que tratarse de una partícula con carga eléctrica. Mediante una fuente de radiación (como el radio) y pantallas fosforescentes para detectar el impacto de los rayos gamma, en octubre de 1899 el científico Friedrich Giesel observó que los puntos de impacto se desplazaban en la pantalla cuando se invertía la orientación de los polos del imán. La radiación beta estaba compuesta por partículas. El siguiente paso consistió en averiguar que se trataba de electrones, tal como hizo Becquerel.

Más descubrimientos

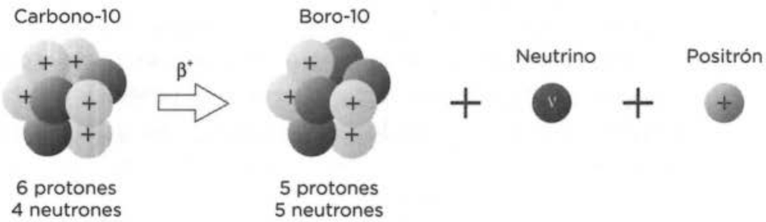
La historia de la desintegración beta no concluye ahí. En 1928, el físico británico Paul Dirac (1902-1984) predijo la existencia de una partícula que tendría la misma masa que el electrón, pero su carga sería de signo opuesto, por lo que se llamó «positrón». Cuatro años más tarde, el físico estadounidense Carl David Anderson (1905-1991) descubrió la presencia de positrones en los rayos cósmicos. Gracias a una cámara de niebla, observó que ante un campo magnético, los positrones trazaban una trayectoria idéntica a la de los electrones —debido a que tenían la misma masa—, pero desviándose en dirección opuesta por tener carga eléctrica opuesta. Además de confirmarse la hipótesis de Dirac, de forma casi inmediata se observó que dicha partícula debía estar vinculada con la desintegración beta. Frédéric Joliot e Irène Curie bombardearon una lámina de aluminio con partículas alfa y observaron que, con el impacto, el aluminio se había transformado en un isótopo radiactivo del fósforo. Además de establecer la posibilidad de la radiactividad artificial, la pareja de científicos franceses también se dio cuenta de que en el proceso emergía un gran número de positrones. Por tanto, la desintegración beta no solo generaba partículas como electrones, sino que también podía dar lugar a esta nueva partícula. Esto significaba que había dos tipos de desintegración beta, que pasaron a llamarse β^- cuando se emitía un electrón y β^+ cuando la emisión consistía en un positrón. A la historia de la desintegración beta aún se le habrían de sumar nuevos hallazgos. El físico austriaco Wolfgang Pauli (1900-1958) se había dado cuenta de que existían fenómenos anómalos en torno a la desintegración beta. Tras la emisión del electrón, el núcleo no experimentaba el retroceso en dirección opuesta al momento adquirido por el electrón, lo que a todas luces parecía indicar que no se conservaba ni el momento ni la energía. En una carta que envió a un

simposio de física en 1930 pronosticó que para solventar el problema tenía que estar implicada en el proceso una nueva partícula que no se había detectado todavía. Según sus predicciones, esta partícula apenas podía tener masa, carecería de carga y se trataría de una partícula de difícil detección. Cuando en 1932 se descubrió el neutrón, se descartó que fuera la partícula a la que se refería Pauli, porque era demasiado masiva. Para diferenciarla del neutrón, el físico italiano Enrico Fermi (1901-1954) optó por llamarla «neutrino». Los neutrinos no se descubrirían hasta 1956, cuando los físicos estadounidenses Clyde Cowan (1919-1974) y Frederick Reines (1918-1998) detectaron billones de estas partículas en un experimento. El proceso de la desintegración beta se acabó de completar cuando se comprobó que en la desintegración β^- se emitía un antineutrino, mientras que en la desintegración β^+ se emitía un neutrino.

Desintegración beta menos (β^-)



Desintegración beta más (β^+)



En la desintegración β^-, uno de los neutrones se convierte en un protón, y se emite un antineutrino y un electrón. Un elemento como el carbono, que tiene 6 protones, pasa a tener 7 protones y se transmuta en nitrógeno. En la desintegración β^+, por el contrario, un protón se convierte en neutrón, emitiéndose un neutrino y un positrón. En este caso, el átomo de carbono pasa a tener 5 protones, transformándose en boro.

que suponía la teoría cuántica. Planck, Hahn o Meitner no podían faltar a la cita en la que se reunirían los científicos más importantes de todo el mundo. Albert Einstein iba a ser uno de los ponentes, y su charla —que fue la primera presentación pública de la teoría de la relatividad— tuvo un impacto definitivo en la joven científica. Tal como ella recordaría décadas más tarde:

> Durante el transcurso de la conferencia, tomó la teoría de la relatividad y a partir de ella derivó la ecuación: energía = masa por la velocidad de la luz al cuadrado, y mostró que a cada radiación había que atribuirle una masa inerte.

Para Meitner, eran ideas «abrumadoramente nuevas y sorprendentes».

A pesar de empezar a hacerse un hueco entre sus colegas científicos, Meitner vivía con estrecheces debido a que no recibía ningún salario, por lo que se vio obligada a aceptar en varias ocasiones trabajos como traductora de artículos científicos, e incluso llegó a escribir algunos artículos de divulgación. Aunque seguía sin cobrar, por lo menos a partir de 1909 el tratamiento discriminatorio contra las mujeres que aplicaba la universidad se palió cuando la Universidad de Berlín consintió finalmente la admisión de mujeres. Este cambio en la normativa le permitió por fin acceder a los despachos en el instituto de química.

Meitner continuó trabajando en el sótano sin cobrar, pero parecían señales de que los tiempos estaban cambiando. Además, el director les ofreció más espacio para que pudieran desarrollar sus experimentos como signo de reconocimiento por su labor. Meitner estuvo trabajando en el sótano del instituto durante cinco años.

EL INSTITUTO KAISER WILHELM

Las instituciones políticas del país estaban trabajando para crear una red de institutos científicos con el propósito de «mantener e incrementar el liderazgo de Alemania en ciencias y en la industria,

que son los pilares del poder alemán». Por esta razón, crearon la Sociedad Kaiser Wilhelm, cuya función consistió en diseñar y promover la creación de centros de investigación. Entre los patronos de la sociedad se encontraba Max Planck.

Desde el principio del proyecto, sus promotores tuvieron claro que estos centros iban a necesitar tanto del apoyo del Gobierno como de la industria. Importantes banqueros y empresarios se implicaron en la financiación, lo que hizo posible que en 1912 se inauguraran tres edificios. Uno de ellos sería el Instituto Kaiser Wilhelm de Química. Este centro de investigación, independiente de la universidad, se encontraba en Dahlem, localidad cercana a Berlín, y contaba con un departamento específico para estudiar radiactividad. Parecía el sitio idóneo para Hahn y Meitner. Su primer director, Ernest Beckmann, contrató de inmediato a Otto Hahn para dirigir el departamento de radiactividad, cargo muy bien remunerado económicamente. Meitner, en cambio, tuvo que conformarse con ser aceptada, pero como investigadora invitada y sin sueldo.

> «Al principio, las cosas no fueron fáciles para Lise.»
>
> — Otto Hahn.

Sin embargo, su situación económica cambió ese mismo año, cuando Max Planck la contrató como asistente. No se trataba solo de un gran honor, sino que para Meitner implicaba además «el pasaporte para la actividad científica a los ojos de la mayoría de científicos y una gran ayuda para superar muchos de los prejuicios existentes en torno a las mujeres académicas». Su tarea era corregir trabajos de varios centenares de estudiantes y escoger semanalmente el trabajo de uno de ellos para que fuera leído en voz alta. No era una tarea fácil y le ocupaba mucho tiempo.

En el nuevo instituto, finalmente, también se le ofreció un contrato, e incluso pasó a dirigir junto a Hahn la sección dedicada a la radiactividad. Había costado muchísimo sacrificio por su parte, pero parecía que su carrera profesional empezaba a tomar altura. Tras dos años en el Instituto Kaiser Wilhelm, la Universidad de Praga le ofreció un puesto académico con un buen salario.

El director del instituto no quiso dejarla escapar, por lo que no dudó en aumentarle el sueldo para retenerla.

En el nuevo instituto, tanto Hahn como Meitner destacaron por sus extremas medidas de higiene y los protocolos que introdujeron para evitar la contaminación de las muestras y los instrumentos. Los elementos radiactivos contaminan con gran facilidad los objetos que tienen a su alrededor, de modo que gracias a todas sus precauciones garantizaban que las mediciones fueran lo más exactas posibles. En la carpintería, tomar estas medidas no

FÍSICA Y QUÍMICA DE LA RADIACTIVIDAD



Símbolo reconocido internacionalmente para indicar la presencia de radiactividad.

La radiactividad había empezado siendo una rama en el marco de la física. Por ejemplo, se empleaban campos eléctricos y magnéticos para estudiar las propiedades de las emisiones. Sin embargo, muy pronto los físicos tuvieron que recurrir a la química para poder determinar, por ejemplo, propiedades químicas de las sustancias radiactivas, para reconocer un elemento a partir de su peso atómico, y para hacer separaciones químicas. Ya Marie Curie debió realizar numerosas tareas concernientes a la química y de hecho trabajó junto al químico francés Gustave Bémont (1857-1937) para hallar el radio. Rutherford, por su parte, también contó con el químico inglés Frederick Soddy, figura imprescindible para la comprensión del proceso de la desintegración radiactiva. Un problema que tenían que afrontar los químicos era que el material radiactivo a menudo se desintegraba al poco rato de ser sintetizado. Para que un químico pudiera trabajar con la radiactividad se requería un estudio especializado, de modo que en numerosas universidades se empezó a formar a químicos en esta nueva disciplina que acabó llamándose radioquímica. Los físicos se habían aproximado en un primer momento a la química, y ahora eran los químicos los que intentaban crear puentes con la física. La radiactividad exigía inevitablemente una aproximación interdisciplinar, como lo demuestra el éxito logrado por el equipo formado por Otto Hahn, uno de los primeros radioquímicos, y la física Lise Meitner.







FOTO SUPERIOR:
En 1911 se celebró en Bruselas (Bélgica) la primera conferencia Solvay. Bajo el tema «la radiación y los cuantos», el congreso reunió a los científicos más relevantes de la época, entre los que se encontraban Max Planck (de pie, primero por la izquierda), Marie Curie (sentada, segunda por la derecha), Albert Einstein (de pie, primero por la derecha) y Ernest Rutherford (de pie, tercero por la derecha).

FOTO INFERIOR IZQUIERDA:
Lise Meitner quedó impresionada con las investigaciones de Niels Bohr y Albert Einstein. En poco tiempo, Meitner consiguió ganarse su respeto y ponerse a su altura. En la imagen, Bohr y Einstein en 1925.

FOTO INFERIOR DERECHA:
Otto Hahn y Lise Meitner en el laboratorio del Instituto Kaiser Wilhelm en 1913.

hubiera servido de nada, pero en los nuevos laboratorios prohibieron, por ejemplo, darse la mano o bien reservaron unas sillas concretas para cuando se manipulaban materiales radiactivos. Es muy posible que gracias a tales medidas de prevención no acabaran sufriendo los efectos perjudiciales para el cuerpo humano que provoca trabajar con radiactividad.

EN GUERRA

En 1914 estalló la Gran Guerra. Buena parte de los trabajadores del Instituto Kaiser Wilhelm fueron llamados a filas, incluido Otto Hahn, casado recientemente con Edith Junghaus, una estudiante de arte a la que había conocido en 1911 en un crucero. Meitner permaneció en el instituto, e informaba por correo postal a Hahn de las novedades y también de algunas malas noticias, como el fallecimiento de algún compañero en el frente.

Hahn fue un soldado más hasta que el ejército alemán se dio cuenta de que era más provechoso que los soldados con formación técnica o científica se dedicaran a crear tecnología de guerra. Al año siguiente, lo ficharon para participar en un programa para elaborar armas químicas junto a Fritz Haber, químico alemán que sería posteriormente reconocido con el premio Nobel de Química en 1918. Haber, que lideraba un extenso equipo de jóvenes, había alcanzado notoriedad por conseguir extraer nitrógeno del aire y usarlo para producir amoniaco, componente fundamental para hacer fertilizantes, lo que supuso una revolución en la agricultura y la industria de la alimentación. Esta vez se le había encomendado la misión de elaborar un gas venenoso. Por lealtad a su país, se vio involucrado en uno de los episodios más cruentos de la guerra, aunque eso no evitó que más tarde también tuviera que escapar de Alemania con la irrupción del nazismo.

A pesar de los reparos que le podía ocasionar el uso de gas venenoso como arma, Hahn intentó pensar en ello como el armamento que podía decantar de manera definitiva la contienda a favor de Alemania, y así poner fin rápidamente al creciente nú-

mero de muertes que estaba provocando la guerra. El gas, creía Hahn, podía llegar a salvar vidas. Sin embargo, esas expectativas no se cumplieron. El gas solo provocó unas muertes terriblemente dolorosas entre los soldados de las filas enemigas.

«Me sentí profundamente avergonzado.»

— OTTO HAHN, SOBRE LAS CONSECUENCIAS DEL USO DE GAS VENENOSO.

Una de las misiones de Hahn consistía en determinar bajo qué condiciones del terreno y meteorológicas el gas causaría un mayor impacto en el enemigo, sin afectar al ejército alemán. El propio Hahn pudo presenciar directamente cómo actuaba el gas en el frente ruso:

> Primero atacamos a los soldados rusos con nuestros gases, y entonces, cuando vimos que los pobres compañeros yacían allí, muriendo lentamente, intentamos que respiraran con mayor facilidad usando con ellos nuestros propios dispositivos para salvar vidas.

La guerra era un sinsentido y las armas químicas lo ponían aún más en evidencia. Durante una entrevista en su vejez, Hahn reflexionó:

> Nos hizo dar cuenta de la insensatez absoluta de la guerra. [...] Primero haces todo lo posible para acabar con la vida del extranjero que se encuentra en las trincheras enemigas, y entonces, cuando te encuentras cara a cara con él, no puedes sostenerle la mirada por lo que has hecho e intentas ayudarle. Pero no pudimos salvar a aquellos pobres compañeros.

Estas experiencias no evitaron que Hahn siguiera trabajando en la elaboración de nuevos tipos de gases e incluso se ofreciera voluntario —en más de una ocasión puso en riesgo su vida— para comprobar el correcto funcionamiento de las máscaras antigás.

En su autobiografía también hay espacio para explicar algunas situaciones anecdóticas que le ocurrieron durante la guerra.

Por ejemplo, en una ocasión un coronel lo presentó a un superior añadiendo que era el descubridor del mesotorio, a lo que el superior repuso: «Entiendo que el teniente Hahn es químico, ¿pero qué relación puede tener con animales antediluvianos?». Había confundido el elemento químico con el de una especie de mamífero ya extinguido, de nombre parecido, y cuyo fósil se había encontrado en aquellos tiempos.

«Nunca supuse que fuera tan espantoso como es en realidad. Esa pobre gente, que a lo sumo serán lisiados, sufren los dolores más horribles. Se pueden escuchar sus gritos y gemidos con toda nitidez, al igual que se pueden ver sus horribles heridas…»

— Lise Meitner, sobre sus experiencias durante la Primera Guerra Mundial.

En 1915, Meitner también se alistó al ejército. Después de recibir formación en un hospital para convertirse en técnica especialista en rayos X, fue enviada a un hospital próximo al frente, al igual que harían Marie Curie y su hija Irène en el ejército francés. Como su labor como asistente de rayos X no le ocupaba demasiado tiempo, también ejercía como enfermera. Pudo presenciar de primera mano los horrores de la guerra. «Como solo estaba a 40 km del frente, nos llegaban los heridos más graves, esto es lo que me decía a mí misma como consolación», afirmó posteriormente. Fue una experiencia traumática, y por esa razón siempre sintió aversión por la guerra, tal como pudo mostrar cuando se negó a participar en la elaboración de la bomba atómica.

En 1917, Meitner regresó al Instituto Kaiser Wilhelm. Tal como recordó:

> Con excepción de nuestra pequeña sección, todo el resto de habitaciones del instituto de química se puso a disposición del profesor Haber y de su grupo para uso militar.

Era necesario impedir que destruyeran los materiales en los que estaban trabajando. Hahn, a su vez, también había sido en-

LA TABLA PERIÓDICA DE LOS ELEMENTOS



Dmitri Mendeléyev en 1897.

La tabla periódica es una manera de clasificar los elementos químicos. Siendo profesor en la Universidad de San Petersburgo, Dmitri Mendeléyev (1834-1907) advirtió que no existía ningún manual de química general suficientemente bueno. Como lo necesitaba para dar clase, optó por elaborarlo él mismo. En esa época se conocían sesenta y dos elementos. Mendeléyev se planteó la necesidad de ordenar todos los elementos a partir de criterios claros. Por un lado, conocía que entre los elementos existían unas semejanzas de tipo químico, a partir de las cuales se podían organizar según familias o grupos. Por otra parte, consideraba que el peso atómico era otro de los criterios que le tendrían que guiar en la elaboración de la tabla. Estos dos criterios por separado no parecían aportar mucho para su clasificación, pero combinados dieron lugar a un mayor entendimiento de las propiedades de las distintas sustancias. Podía disponer los elementos según el peso atómico, pero llegado a cierto punto, las características químicas del elemento se repetían, formando una cierta periodicidad.

Llenando huecos

Durante la elaboración de la tabla, Mendeléyev se encontró con dos cuestiones. Primero, había elementos que no encajaban y, segundo, había huecos. Con ello, consideró que los elementos que no encajaban era debido a que sus pesos atómicos pudieran haberse calculado mal. Respecto a las posiciones vacías, pronosticó que en el futuro iban a hallarse los elementos que encajarían en esos lugares. Al ubicarlos según la tabla, también se atrevió a adelantar las propiedades químicas e incluso los pesos atómicos de dichos elementos todavía desconocidos. Mendeléyev predijo con detalle tres elementos en 1871. Cuatro años más tarde se encontraría el galio, y se vio que encajaba perfectamente con uno de los elementos predichos. Una de las principales evoluciones que sufrió la tabla fue el descubrimiento de los gases nobles. En 1895, William Ramsay descubrió junto a lord Rayleigh el argón, un gas inerte, esto es, que no reaccionaba químicamente con otros elementos. Posteriormente, Ramsay hallaría el helio, el neón y el xenón. Además de tratarse de gases inertes, se dio cuenta de que no conseguía hallar su hueco en la tabla según su peso. Para solucionarlo, en 1900 propuso a Mendeléyev que modificara la tabla incluyendo una nueva columna que específicamente agrupara a los gases nobles.

viado a Berlín, de modo que en algunas ocasiones podía aproximarse hasta el instituto para seguir trabajando en equipo. Tenían algunos experimentos en curso, y uno de ellos les condujo al descubrimiento del protactinio.

EL PROTACTINIO

Por un lado, se sabía que en la tabla de los elementos había un hueco por completar, entre el uranio y el torio. Por otro, Hahn había estado estudiando atentamente el actinio, un elemento radiactivo de color azulado y muy escaso, descubierto en 1899 por el físico y químico francés André-Louis Debierne (1874-1949), y del que se sabía que se desintegraba con facilidad. Al tratarse de un elemento que en los minerales se encontraba junto al uranio, era lógico pensar que formaba parte de alguna de sus series de desintegración. La relación entre el uranio y el actinio no estaba clara, parecía que faltaba alguna pieza para comprender el vínculo entre los elementos.

Desde antes del estallido de la guerra, empezaron a buscar el nuevo elemento en la pechblenda, el mineral en el que se había encontrado por vez primera uranio y en el que los Curie detectaron también el polonio y el radio. Cuando se inició el conflicto bélico, tuvieron que aplazar la investigación, pero a principios de 1917 Meitner estaba decidida a continuarlo en solitario. Era un trabajo difícil para una sola persona. Meitner siempre mantuvo un incesante intercambio postal con Hahn, y en una de sus cartas le explicó, justificándose de sus lentos avances:

> Créeme, no es debido a falta de voluntad, sino por falta de tiempo. No puedo hacer el mismo trabajo que el que hacíamos cuando estábamos los tres juntos.

Empezó procediendo a la disolución de la pechblenda con ácido. Más tarde, separó químicamente los elementos radiactivos ya conocidos, como el radio. Estudiando el preparado obtenido,

llegó a la conclusión de que «contenía una nueva sustancia». Emitía una radiación alfa muy intensa y particular que para Meitner era la prueba de que tenía que tratarse de un elemento nuevo. De manera muy intermitente, Hahn también estuvo en el laboratorio y contribuyó al descubrimiento determinando químicamente la nueva sustancia, y algunas otras propiedades.

Este estudio duró meses y el resultado se publicó en 1918. Ese mismo año terminó la guerra con la derrota alemana. Se restablecieron las comunicaciones y los intercambios entre científicos, y entonces Hahn y Meitner se llevaron la sorpresa de su vida al descubrir que un equipo en el Reino Unido formado por Frederick Soddy y John Cranston también había publicado el descubrimiento del mismo elemento. No habían logrado detallar con tanta precisión sus características y un comité científico concluyó más tarde que la prioridad la tenían Hahn y Meitner. La discusión sobre el nombre que se le debía poner fue también prolongada (se sugirió incluso que se llamara Lisonium, en honor a Lise Meitner). Finalmente se escogió protoactinio, nombre que se abrevió por el de protactinio, y el símbolo Pa, e iba a ocupar la posición 91 de la tabla periódica.

A pesar de ser una tragedia, la guerra dio un gran impulso al Instituto Kaiser Wilhelm. El estamento militar se había percatado de la importancia de la ciencia y en particular de la química, y la industria alemana se volcó en los estudios de química porque consideraba que podía ser una de las claves para la recuperación del país. El instituto además contaba con suficiente independencia como para que sus investigadores pudieran ocuparse de sus propios proyectos. A finales de 1918, Meitner fue nombrada directora del departamento de Física.

EL ENCUENTRO CON BOHR

Meitner se encontraba en el corazón de la revolución en física que se estaba produciendo en aquel tiempo. Se carteaba, por ejemplo, con Einstein, quien en una carta escribió a Meitner: «¿Qué piensa

de este problema? Llámeme y así me podrá dar su opinión». Meitner supo ganarse el respeto de los principales científicos de la época, y de hecho había llegado a situarse a su altura.

Otro momento que recordaría durante toda su vida fue cuando conoció a Niels Bohr. Como la propia Meitner escribiría posteriormente:

> Durante la Primera Guerra Mundial, la física se había dotado de una base enteramente diferente, tanto desde el punto de vista experimental como teórico. [...] El principal crédito de esta transformación residía en Niels Bohr y su trabajo sobre la estructura del átomo.

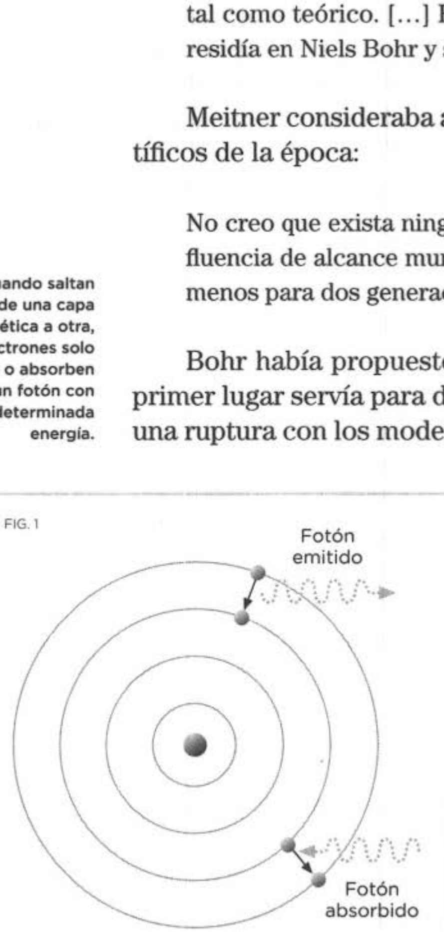
Meitner consideraba a Bohr como uno de los principales científicos de la época:

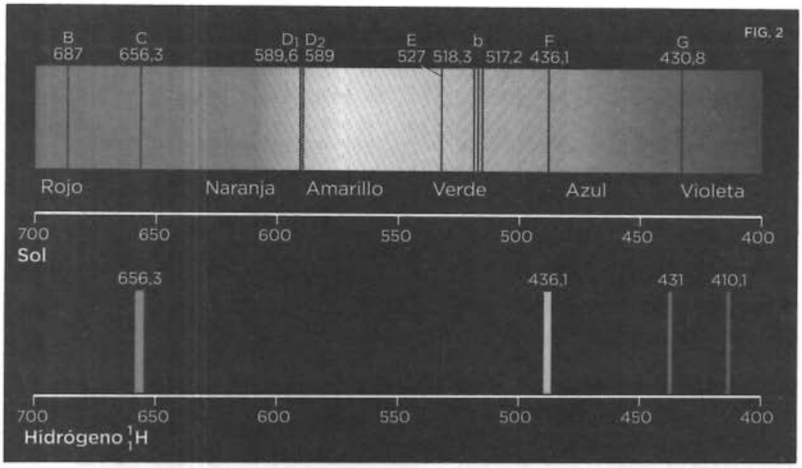
> No creo que exista ningún otro científico que haya ejercido una influencia de alcance mundial como la que alcanzó Niels Bohr por lo menos para dos generaciones de físicos.

Cuando saltan de una capa energética a otra, los electrones solo emiten o absorben un fotón con determinada energía.

Bohr había propuesto un modelo de átomo en 1913, que en primer lugar servía para describir el átomo de hidrógeno. Supuso una ruptura con los modelos precedentes, en especial respecto al estado y el comportamiento de los electrones. Bohr desechó las leyes de la mecánica clásica y en su lugar había usado la nueva teoría cuántica. Propuso que un electrón, que se encuentra en una órbita determinada, ni emite ni absorbe energía, a pesar de que según las leyes de la física clásica, al describir una trayectoria curvada debería emitir radiación electromagnética, y por tanto no permanecería en una órbita. Según presentó, cada órbita corresponde a un nivel de energía, y estos niveles están cuantizados; es

FIG. 1





Bohr pudo explicar los espectros de absorción y de emisión de elementos simples como el hidrógeno basándose en su modelo atómico. Cada franja se correspondía con los niveles discretos de energía en los que se podía producir la emisión o la absorción de luz por parte de los electrones. En la parte superior de la figura se puede ver el espectro de absorción del hidrógeno, y en la parte inferior el de emisión.

decir, solo están permitidos unos determinados valores discretos. Cada órbita correspondía a un nivel de energía, cuyo valor se relacionó con los espectros electromagnéticos de absorción del hidrógeno conocidos desde el siglo XIX.

Cuando los electrones pasaban de unas órbitas a otras, se producía la emisión o la absorción de energía (figura 1). Los niveles más próximos al núcleo son los de menor energía, y los electrones saltan a niveles superiores cuando absorben un fotón. Por el contrario, cuando un electrón pasaba de un nivel de energía más excitado a otro nivel inferior, entonces emite un fotón, de energía determinada. La emisión y la absorción discretas de energía son las que luego quedan representadas en los espectros de los elementos como características bandas de emisión y de absorción (figura 2).

Lise conoció a Bohr en 1920, cuando este viajó a Berlín para impartir una conferencia. Tal como relató Meitner, salió de la conferencia «en cierto modo deprimida porque había tenido la sensación de entender muy poco». Aprovecharon la estancia de Bohr para invitarlo al instituto y pasar el día junto al ilustre invitado, y así tener la oportunidad de que les explicara con detalle sus propuestas e ideas. Pero los lazos de amistad que se crearon entre ambos científicos se forjaron cuando —esta vez fue Meitner— fue

DE RUTHERFORD A BOHR

El descubrimiento del núcleo atómico en 1911 significó un gran avance para el conocimiento de la estructura de la materia. Sin embargo, arrojó a Rutherford y al resto de científicos a una paradoja que parecía irresoluble. Los electrones debían girar alrededor del núcleo en círculos concéntricos, pero aplicando las leyes electrodinámicas conocidas en ese momento, los electrones emitirían energía, de modo que al perderla, en poco tiempo se tendrían que colapsar sobre el núcleo. Había una errónea consideración de base, y Bohr fue el primero en darse cuenta de que las leyes que sirven para el mundo macroscópico y observable de forma cotidiana no son las que rigen el mundo subatómico. Niels Bohr, trabajando a las órdenes de Rutherford, logró introducir las leyes cuánticas para explicar el mundo subatómico. Bohr determinó la manera en la que los electrones se organizaban en capas o niveles: los electrones con menor energía se situaban más cerca del núcleo, mientras que los más energéticos se colocaban en el exterior. Los niveles energéticos eran discretos, estaban cuantizados. Y para que se produjera el salto de un electrón de un nivel a otro se debía absorber o emitir energía en forma de fotones.



Ernest Rutherford hacia 1910.

invitada a dar una conferencia en Copenhague en 1921. Pasó parte del verano en compañía de Bohr y su familia. «Aún hoy puedo sentir la magia, y nuestro primer encuentro», relató Meitner. Hacia el final del verano tuvo tiempo para viajar hasta Suecia y trabajar junto al físico sueco Manne Siegbahn (1886-1978). Estos contactos posteriormente tendrían un gran significado para Meitner, cuando se vio obligada a escapar del nazismo. Justo al año siguiente, en 1922, la atención internacional se centraría en Bohr y su instituto al ser galardonado con el premio Nobel de Física.

EL ESTUDIO DE LOS ELECTRONES

Tras la derrota de Alemania, en 1919 se aprobó una nueva constitución que ponía punto final a la época imperial y daba paso a una democracia liberal y republicana. Se inauguraba la República de Weimar —en referencia a la localidad en la que se aprobó la constitución—, y se vivía un período marcado sobre todo por la inestabilidad. En lo político, en esta época se vivieron constantes golpes de estado. En lo económico, hubo una terrible hiperinflación, que acabó con los ahorros de toda las clases media y trabajadora. El malestar social era evidente, y se convirtió en terreno abonado para que calara el discurso racista y nacionalista del partido liderado por Adolf Hitler, quien en 1933 se alzaría con el poder.

El discurso antisemita también se extendió entre el estamento científico. El principal objeto de los ataques era Einstein, que encarnaba la «ciencia judía» que los arios denostaban. En una carta dirigida a Hahn, Meitner dejó testimonio de los escarceos antisemitas de sus colegas y de los ataques que sufría Einstein:

> De acuerdo con mis sentimientos, las conferencias anti-Einstein con un trasfondo antisemita no proporcionan ningún honor a los alemanes, y se podría hablar realmente de barbarismo. [...] ¿Surgirá de nuevo la Santa Inquisición con Herr Gehrcke [un físico alemán] como el Gran Inquisidor?

En medio de estos tiempos tan convulsos, Meitner siguió progresando en su carrera. En 1922 recibió la habilitación para impartir clases, de modo que se convirtió en la primera profesora universitaria en Alemania, una labor que ejerció durante los siguientes diez años. La Academia de Ciencias de Viena le otorgó el premio Ignaz Lieber como reconocimiento a sus hallazgos y también se le concedió la medalla de plata Leibniz. Ya en 1923, Hahn y Meitner fueron candidatos al premio Nobel a propuesta de Max Planck.

Ambos científicos siguieron vinculados al Instituto Kaiser Wilhelm, pero esta vez cada uno de ellos lideraría su propia sec-

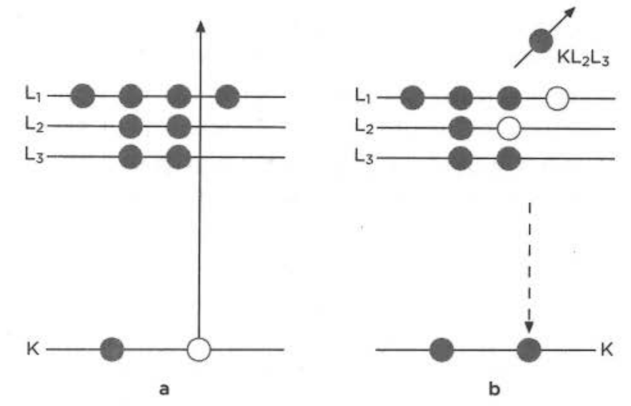
ción: Meitner la radiofísica y Hahn la radioquímica. Hahn se mostró especialmente habilidoso para relacionarse con la industria, recaudar fondos y encontrar financiación para el instituto, una tarea que, por otro lado, debido a la inflación, todos los responsables debían en cierta manera asumir si no querían quedarse sin fondos para seguir investigando. Con el tiempo, cada vez fue asumiendo mayores responsabilidades en el funcionamiento del instituto.

Así recordaba la propia Meitner esos momentos:

> Como resultado de la división del instituto en dos secciones, Hahn y yo ya no trabajamos conjuntamente a partir de 1920. En el departamento de Química, Hahn y sus colegas hicieron un trabajo importante sobre radioquímica aplicada. [...] Nuestro trabajo estaba naturalmente dirigido a la física; por ejemplo, investigamos las líneas espectrales de la radiación beta, y fuimos capaces de establecer su relación con la radiación gamma.

Meitner seguía manteniendo contacto con Hahn, pero era más indirecto. Habían dejado de tener proyectos en común. Ella tenía que supervisar la labor de los estudiantes graduados, a los que inculcaba los protocolos para mantener sus estrictas condiciones de prevención de trabajo en el laboratorio. También seguía interesada en proseguir con la investigación fundamental. Se introdujo, por ejemplo, en el uso de la cámara de niebla para estudiar las partículas subatómicas. En 1922 publicó otro artículo esencial, para explicar esta vez un fenómeno que ha pasado a conocerse como «efecto Auger». Debido al bombardeo de materiales con rayos X —radiación electromagnética de alta energía—, en el átomo se puede producir el arranque de los electrones más próximos al núcleo, de modo que se desencadena un proceso por el que este nivel electrónico pasa a ser ocupado por alguno de los electrones de las capas inmediatamente superiores. Como consecuencia, se emite un fotón de energía característica correspondiente a la diferencia entre los niveles energéticos. De forma adicional, ocurre que una mayor estabilidad se consiga con la emisión de alguno de los electrones de sus capas más externas. La pérdida de este

FIG. 3



Debido a la irradiación con rayos X, un átomo sufre la pérdida de un electrón de las capas más próximas al núcleo —paso a—. Ese hueco pasa a ser ocupado por otro electrón de capas superiores —paso b—, y en ese proceso el átomo puede emitir un fotón; si pierde un electrón de las capas más externas, a ese fenómeno se le conoce como «efecto Auger», y a este segundo electrón se le llama «electrón Auger».

segundo electrón es el fenómeno al que hace referencia el efecto Auger (figura 3).

En 1925, el mundo de la física volvió a temblar con la publicación de un nuevo teorema de la teoría cuántica, entre cuyos precursores se encontraba un jovencísimo Werner Heisenberg (1901-1976). Meitner siguió de primera mano todas estas nuevas teorías, y participó en numerosas conversaciones y congresos. Durante esa época llegó a Berlín Otto Robert Frisch, su sobrino, recién graduado en física y que iba a tener un importante protagonismo tanto en la vida de Lise como en la historia de la fisión nuclear.

EL CAMINO HACIA LA FISIÓN

«En 1932 había veinticinco científicos contratados en nuestras dos secciones [la de Hahn y la de Meitner]», explicaba Meitner, orgullosa de los progresos realizados en el instituto desde sus inicios. Pero al año siguiente, a pesar de no haber conseguido la victoria electoral, Adolf Hitler se convirtió en el canciller de Alemania. Con el *crack* de 1929 y la muerte del canciller Gustav Stresemann

—que había guiado al país durante la República—, parecía que los acontecimientos se precipitaban. Einstein, que se encontraba en Estados Unidos cuando Hitler llegó al poder, optó por no regresar.

Una vez en el poder, el partido nazi adaptó la legislación a su discurso racista. Se introdujeron normativas para forzar el despido de aquellos individuos que no acreditaran su pertenencia a la raza pura, esto es, aquellos que ni sus abuelos ni sus padres fueran judíos. Aunque Meitner se había convertido al protestantismo décadas atrás, para los nazis seguía siendo judía, aunque su nacionalidad austriaca la protegía. Una vez que fue instada a completar el cuestionario sobre el origen de sus abuelos, se le comunicó que ya no podía seguir ejerciendo como profesora. No sirvió de nada que Planck o Hahn intermediaran para evitar esa situación.

Numerosos científicos judíos trataron de huir de Alemania, aunque la crisis dificultaba la tarea de asentarse en otros lugares. Meitner, por su parte, optó por ignorar las amenazas y los discursos cargados de odio, creyendo que era un fenómeno circunstancial. No tenía ninguna razón para dejar de investigar en el Instituto Kaiser Wilhelm, cargo que había podido mantener. En esos momentos, además, había iniciado una nueva investigación por la que reanudó la colaboración con Hahn. Se trataba de seguir los pasos iniciados por Enrico Fermi investigando con el uranio y el bombardeo de neutrones. Este estudio fue el que llevaría a Meitner y a Hahn a descubrir finalmente la fisión nuclear.

CAPÍTULO 4

La fisión nuclear

Como consecuencia del bombardeo de átomos de uranio con neutrones, puede ocurrir que el núcleo atómico se divida en dos partes aproximadamente iguales, liberando una notable cantidad de energía en el proceso. Con este experimento, Meitner y Hahn, asistidos por Strassmann y Fischer, descubrieron la fisión nuclear. Estos científicos basaron su investigación en trabajos realizados previamente por otros físicos como Fermi, Rutherford o los Joliot-Curie.

El descubrimiento de la fisión nuclear marcó un antes y un después en la historia no solo de la física, sino también de la humanidad. Fue un logro conseguido gracias al trabajo iniciado por Meitner, junto con Hahn. También fue un colaborador indispensable el químico Fritz Strassmann, que sustituía a Hahn cuando este tenía que ocuparse de los aspectos burocráticos del funcionamiento del Instituto Kaiser Wilhelm. Más adelante cabe destacar la labor de Otto Robert Frisch, el sobrino de Meitner.

Desafortunadamente, la fisión nuclear también hizo posible la fabricación de la bomba atómica, desarrollada por Estados Unidos durante la Segunda Guerra Mundial y lanzada contra las ciudades japonesas de Hiroshima y Nagasaki, lo que precipitó el final de la contienda. Posteriormente la fisión se ha empleado con fines pacíficos mediante la construcción de centrales nucleares para la producción de energía eléctrica.

Tal como se verá a lo largo de este capítulo, tomaron como punto de partida el trabajo realizado por Rutherford y por Irène Curie y Frédéric Joliot. Pero su más directo precedente fue Enrico Fermi, físico italiano inspirador de los experimentos. Meitner vivió una época de gran tensión: mientras conducía la investigación más importante de su vida se propagó el nazismo. De esta manera, la fisión nuclear se descubrió en un ambiente envilecido por el racismo y la xenofobia.

LA DIVISIÓN NUCLEAR

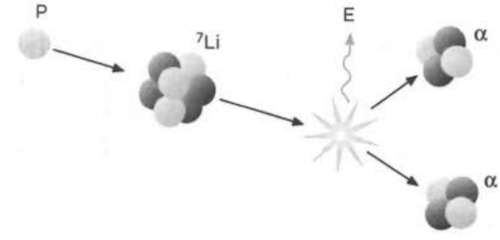
El camino que condujo a la fisión nuclear se empezó a trazar a principios del siglo XX con el descubrimiento del núcleo atómico. Rutherford no se conformó con descubrir el núcleo como parte constituyente del átomo, sino que fue el primero en tratar de descomponerlo para estudiar si estaba constituido por una estructura interna. En uno de sus experimentos, realizados en 1917, bombardeó los núcleos de átomos de nitrógeno con partículas alfa —formadas por dos protones y dos neutrones, y que pueden originarse en la desintegración radiactiva de ciertos elementos como el polonio—. Cuando el núcleo de nitrógeno absorbía una partícula alfa, dando lugar a una cierta inestabilidad nuclear, el proceso desembocaba en la eyección de un protón. Las cuentas sobre el balance de partículas son claras: el nitrógeno tiene siete protones, a los que hay que se sumar los dos protones de la partícula alfa que absorbe. Con la emisión de un protón, el resultado final es un núcleo con ocho protones, lo que se corresponde con el elemento oxígeno. De esta manera, quedaba probado que los elementos se pueden transmutar, evento provocado de manera artificial.

«Nadie pensó realmente en la fisión antes de su descubrimiento.»

— LISE MEITNER.

En 1932, Rutherford dirigía el laboratorio Cavendish de Cambridge, cuando dos de sus discípulos, John Douglas Cockcroft y Ernest Walton, construyeron un acelerador de partículas. Este aparato les permitía arrojar protones energéticos contra, por ejemplo, una lámina de litio. La absorción de un protón en un núcleo de litio — constituido por tres protones— implicaba la desestabilización de un nuevo núcleo inestable, y se observaba que se desintegraba en dos fragmentos de igual masa. En concreto, cada fragmento consistía en una partícula con dos protones y dos neutrones, o, lo que es lo mismo, el litio se transformaba en dos partículas alfa (figura 1). La determinación de los productos del proceso de desintegración se realizaba con unas pantallas fosfo-

FIG. 1



El núcleo del átomo de litio absorbe un protón, lo que desencadena el proceso por el que da lugar a la ruptura del núcleo original en dos partículas alfa.

rescentes que registraban el impacto de las partículas alfa con un característico centelleo por cada evento.

Este experimento tenía grandes implicaciones desde un punto de vista fundamental, tal como se hicieron eco los medios de la época, pero también podía tener gran importancia por su aplicación práctica, debido a la liberación de energía en la desintegración. Sin embargo, Rutherford estaba convencido de que para la aceleración de los proyectiles había sido necesario usar más energía de la que posteriormente se generaba. Es decir, se creía probado el potencial energético de los átomos, pero su explotación parecía todavía ineficaz. Rutherford, un extraordinario experimentador, no fue capaz de adivinar las posibilidades en términos energéticos que se hallaban contenidas en la materia:

> Estas transformaciones del átomo son de un interés extraordinario para los científicos, pero no podemos controlar la energía atómica hasta el punto de que pueda tener algún valor comercial, y creo que no nos aproximaremos ni remotamente a conseguirlo [...] Nuestro interés por la materia es puramente científico, y los experimentos que se están llevando a cabo nos ayudarán a entender mejor la estructura de la materia.

Esto cambió con el descubrimiento de otra partícula constituyente del núcleo atómico, el neutrón, que acabó por convertirse en el mejor proyectil para los experimentos de bombardeo de los núcleos atómicos de los diversos elementos químicos.

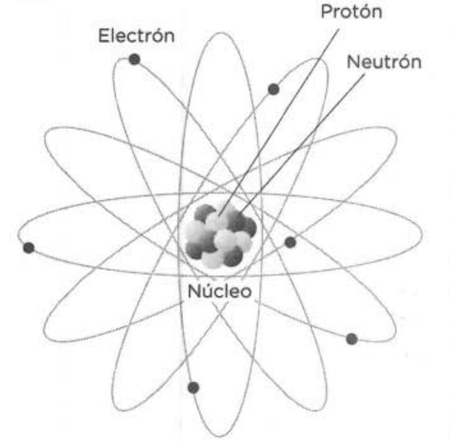
EL NEUTRÓN

En 1932, James Chadwick, que fue también discípulo de Rutherford en el laboratorio Cavendish, anunció el descubrimiento del neutrón. A diferencia del protón y del electrón, esta nueva partícula se caracterizaba por no tener carga eléctrica y su tamaño era casi idéntico al protón. Precisamente, la ausencia de carga eléctrica había dificultado su detección.

Con el descubrimiento del neutrón (figura 2) se abrirían nuevas posibilidades para el estudio del átomo mediante el bombardeo con partículas, ya que la técnica hasta entonces había estado reservada a las partículas alfa. Al tener carga eléctrica neutra, el neutrón no se ve afectado por los campos eléctricos circundantes, como sí les ocurre a electrones y protones, de modo que, usado como proyectil, el neutrón podría alcanzar el núcleo sin que su trayectoria se viera alterada por la presencia de campos electromagnéticos intrínsecos y extrínsecos. Hasta entonces, la experimentación se había llevado a cabo con partículas alfa, pero estas presentaban una limitación importante: debido a su carga positiva sufren una fuerte repulsión al aproximarse al núcleo, de magnitud proporcional al número de cargas positivas que formen el núcleo atómico usado como blanco —fenómeno llamado «apantallamiento»—. Por ello, los experimentos solo funcionaban para átomos ligeros; para núcleos de masa atómica como los del uranio, la fuerza repulsiva era demasiado fuerte para que se llegara a producir la colisión de las partículas alfa con el núcleo atómico.

Tras el descubrimiento del electrón y del protón, el neutrón fue la tercera partícula fundamental constituyente del átomo que llegó a conocerse de manera experimental.

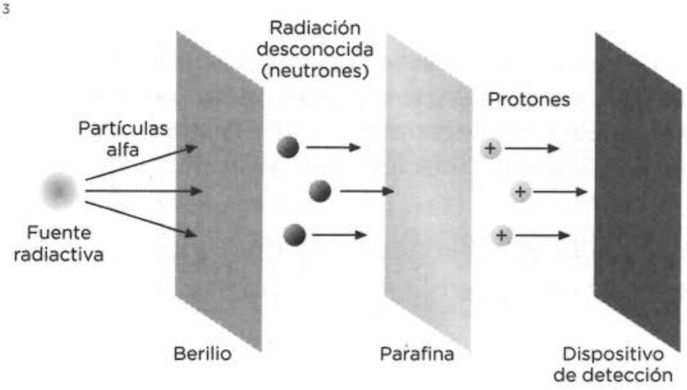
FIG. 2



LA RADIACTIVIDAD ARTIFICIAL

Desde París, la pareja de científicos formada por Irène Curie y Frédéric Joliot también realizó importantes

FIG. 3



El experimento que permitió descubrir los neutrones fue realizado por los Joliot-Curie, aunque solo Chadwick fue capaz de interpretar correctamente lo que estaba ocurriendo.

aportaciones que conducirían a Meitner a la enunciación de la fisión nuclear. Irène Curie había seguido la estela de su madre en el camino de la ciencia y, también como ella, se había emparejado profesional y sentimentalmente con otro investigador. No acaban aquí las similitudes, pues como ya ocurriera con Marie y Pierre Curie, los Joliot-Curie también recibieron un premio Nobel, en este caso el de Química, en 1935, por el descubrimiento de la radiactividad artificial.

Los Joliot-Curie ya habían dado muestras de formar un equipo muy capaz con experimentos como el que posteriormente permitió a Chadwick descubrir el neutrón. La pareja investigó la radiación que emergía al bombardear berilio con rayos alfa, descubierta en 1930 por un grupo de científicos alemán. Se trataba de una radiación muy penetrante, y por eso en un principio se confundió con los rayos gamma.

Irène y Frédéric demostraron que esa radiación era capaz de arrancar protones cuando impactaba en parafina. Sin embargo, no pensaron en el hecho de que los rayos gamma no tenían la capacidad para arrebatar protones al núcleo. Esa radiación debía tratarse, por tanto, de una nueva partícula sin carga, tal como interpretó correctamente Chadwick con la ayuda de Rutherford (figura 3).

El descubrimiento de la radiactividad artificial se produjo en 1934, tras bombardear boro y aluminio con partículas alfa y observar que estos elementos se convertían en elementos distintos. El aluminio, por ejemplo, se convertía en fósforo y de este modo, de forma provocada, se tornaba en un elemento radiactivo, dando lugar a la emisión de radiación en su desintegración.

«Los experimentos hay que diseñarlos de manera que abran tantas ventanas como sea posible en lo imprevisto.»

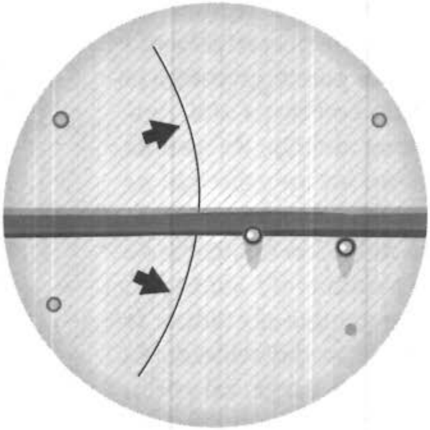
— Frédéric Joliot.

Mediante una cámara de niebla, se puede observar cómo la trayectoria de un positrón en el seno de un campo magnético se desvía con el mismo radio de curvatura que un electrón, pero en sentido contrario.

Esta reacción inducida constituía un fenómeno nuevo totalmente inesperado. Nunca antes se había observado que elementos ligeros pudieran ser fuentes de emisión radiactiva. Y además, indicaba que la radiactividad podía provocarse, no era una característica exclusiva de algunos átomos pesados, como el uranio o el radio.

En la reacción estudiada por la pareja de científicos Joliot-Curie, el aluminio se convertía en fósforo tras el impacto de la partícula alfa y se emitía también un neutrón. El isótopo de fósforo resultante era inestable, con una vida media de tres minutos, de modo que se desintegraba emitiendo un positrón y formando silicio.

FIG. 4



Según palabras textuales de Meitner, «el significado de estos extraordinarios y bellos resultados tiene realmente un largo alcance». Meitner logró reproducir estos experimentos en su laboratorio, y fue capaz de capturar positrones con una cámara de niebla (figura 4), que eran el producto final del proceso inducido por el bombardeo de aluminio con rayos alfa.

RADIACTIVIDAD ARTIFICIAL

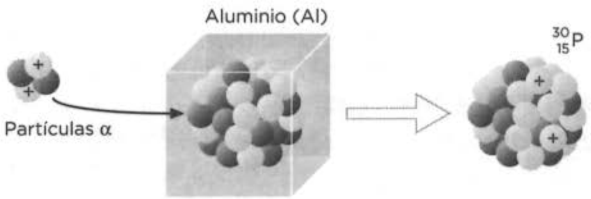
El proceso que pusieron al descubierto los Joliot-Curie es el siguiente. De entrada, el aluminio (Al), constituido por trece protones, absorbía los dos protones de la partícula alfa —es decir, un núcleo del elemento helio, cuyo símbolo es He—, de forma que se genera un nuevo núcleo con quince protones, que corresponde al fósforo (P) (véase la figura). En la reacción también se produce la liberación de un neutrón. Esta reacción se puede representar de la siguiente manera en términos de los elementos y sus números atómico y másico:

$$^{4}_{2}He + ^{27}_{13}Al \rightarrow ^{30}_{15}P + ^{1}_{0}n$$

En la reacción se indica el número atómico —el número situado en la parte inferior izquierda del símbolo del elemento, y que se representa con la letra Z—, que es el número de protones que tiene el elemento, y el número másico —situado en la parte superior izquierda (letra A)—, que corresponde a la suma de protones y neutrones. El fósforo sufre una desintegración beta, β^+, es decir, se convierte en silicio (Si) acompañado de la emisión de un positrón (e^+):

$$^{30}_{15}P \rightarrow ^{30}_{14}Si + e^{+}.$$

El número de partículas nucleares —protones y neutrones— a lo largo de todo el proceso de desintegración se conserva.



EL PROYECTO DE FERMI

Los Joliot-Curie habían logrado producir elementos inestables y con ello radiactivos (radiactividad artificial). Sin embargo, en los átomos de número atómico alto, la concentración de carga eléctrica positiva impedía que las partículas alfa, empleadas para de-

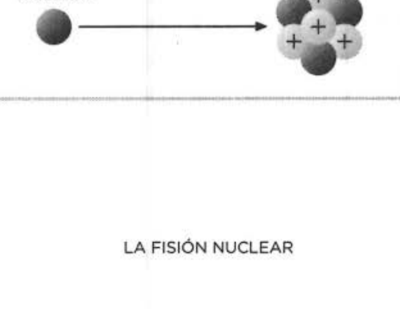
sencadenar procesos radiactivos, pudieran aproximarse al núcleo y colisionar debido a la repulsión coulombiana. El físico italiano Enrico Fermi pensó entonces en evitar el apantallamiento de la trayectoria de los proyectiles sustituyendo las partículas alfa por neutrones en el bombardeo de elementos pesados. Fermi supuso acertadamente que, al carecer de carga eléctrica, los neutrones alcanzarían los núcleos de los átomos del material que ejercía de blanco —especialmente en el caso de átomos con un número atómico alto— con mayor eficacia que las partículas alfa (figura 5). Así describió Meitner la propuesta de Fermi:

> Fermi reconoció que los neutrones, por su ausencia de carga, podían penetrar en elementos pesados —esto es, elementos que ocupan posiciones elevadas en la tabla periódica—, y que también servirían para producir reacciones nucleares.

Fermi y su extraordinario equipo de investigadores, entre los que se encontraban Ettore Majorana y Emilio Segrè, empezaron por dotarse de una fuente de neutrones. Usaron radón —un gas noble producto de la desintegración de radio— mezclado con polvo de berilio, debido a que este reaccionaba emitiendo neutrones. Además, también construyeron un aparato para la detección de los productos de desintegración, lo que hoy conocemos como contador Geiger, para poder registrar con precisión la radiactividad generada en los elementos.

A partir de entonces, Fermi se dedicó a estudiar sistemáticamente el bombardeo de todos los elementos de la tabla periódica. Los resultados de su investigación aparecieron en tres artículos que vieron la luz en la revista italiana *Nuovo Cimento* —que escogió por la rapidez en la publicación— y también en la prestigiosa revista británica *Nature*. El primer artículo se publicó en marzo de 1934 y el último en mayo del mismo año. Debido a la

FIG. 5



Mientras que el protón —o un par de protones, como en la partícula alfa— experimenta una desviación debido a las fuerzas de repulsión que sufren cargas eléctricas del mismo signo, el neutrón es capaz de alcanzar y así colisionar con mayor facilidad con el núcleo atómico.

expectación despertada en toda Europa, se enviaron inmediatamente ejemplares de *Nuovo Cimento* en italiano a los principales científicos de la época, entre los cuales se encontraba Meitner. Por tanto, desde el primer momento, ella estuvo al corriente de las investigaciones realizadas en Italia e incluso llegó a reproducir alguno de sus experimentos para su verificación.

> «Me congratulo de que te hayas escapado de la esfera de los físicos teóricos.»
>
> — Ernest Rutherford, dirigiéndose a Fermi, a propósito de sus experimentos con los neutrones.

Su sobrino Otto Robert Frisch, que ya se encontraba en Copenhague trabajando junto a Bohr, también estaba suscrito a *Nuovo Cimento*, publicación que seguía con gran expectación. Como era el único que entendía el italiano, tras la recepción del ejemplar se formaban corros a su alrededor. Eran tiempos de gran excitación y descubrimientos sorprendentes.

LOS ELEMENTOS TRANSURÁNICOS

Después de bombardear con neutrones toda la variedad de elementos conocidos de la tabla periódica, Fermi obtuvo básicamente tres reacciones distintas. En los elementos ligeros, observó que tras el impacto había dos posibilidades: el elemento podía reaccionar emitiendo un solo protón, o bien una partícula alfa. En los elementos pesados, lo más frecuente era que se produjera una desintegración tipo beta, emisión de electrones. En cualquiera de las reacciones observadas, el impacto del neutrón ocasionaba una transformación cuyo producto era un elemento con un número atómico ligeramente diferente al original, que como máximo podía variar en dos posiciones en la tabla periódica.

El equipo de Fermi también observó que todos los elementos producidos artificialmente por el impacto de neutrones eran asimismo radiactivos y emisores de radiación beta, con la implícita transmutación del elemento químico. El más pesado de los

elementos que se propuso estudiar Fermi fue el uranio. Con sus 92 protones, era el de mayor número atómico conocido hasta la fecha. Su convicción era que, al igual que en los casos anteriores, el neutrón sería absorbido por el núcleo y entonces se produciría una desintegración beta, en la que un electrón escaparía del núcleo —radiación tipo beta—, mientras que la variación en el número de protones suponía la transformación del elemento químico. Como el uranio tenía 92 protones, tras la desintegración beta pasaría a tener 93 protones, dando lugar a un nuevo elemento. Esta era la idea subyacente en el concepto —la existencia— de los elementos transuránicos. Por primera vez en la historia, parecía que era posible sintetizar artificialmente nuevos elementos, más pesados, y la noticia fue recibida con entusiasmo por parte de la comunidad científica.

«Sea lo que sea lo que la naturaleza tiene reservado para la humanidad, por desagradable que pueda ser, los hombres deben aceptar que la ignorancia nunca es mejor que el conocimiento.»

— Enrico Fermi.

Meitner se refirió de esta manera a los experimentos realizados por Fermi:

> Junto a un grupo de jóvenes colaboradores, algunos de los cuales había formado él mismo, Fermi irradió todos los posibles elementos con neutrones y entonces obtuvo, de los elementos pesados, una serie de nuevos isótopos radiactivos. El experimento que arrojó los resultados más interesantes fue la radiación del uranio, que es el elemento más pesado. Fermi era de la opinión que esto tenía que conducir a elementos más elevados con números atómicos de 93 y 94 —esto es, trans (por encima del) uranio—.

Fermi se acabaría desentendiendo del estudio de los transuránicos para dirigir su atención a otros objetos de estudio. Sin embargo, vio recompensado su trabajo con el premio Nobel de Física de 1938, «por sus demostraciones sobre la existencia de nuevos

ENRICO FERMI



Las contribuciones que realizó Enrico Fermi a la física fueron fundamentales para el desarrollo de la llamada «era nuclear». Realizó experimentos con neutrones como técnica para estudiar la radiactividad artificial, y fue capaz de producir la reacción en cadena, mecanismo fundamental para liberar de forma masiva la energía contenida en los átomos. Nacido en Roma en 1901, Fermi fue un estudiante destacado y gracias a la Fundación Rockefeller pudo estudiar en Alemania y en Noruega, donde conoció a algunos de los físicos más reputados del momento, como el alemán Max Born (1882-1970). En 1924 fue contratado por la Universidad de Florencia, donde realizó su primera contribución importante a la física: el estudio estadístico del comportamiento de un tipo de partículas subatómicas, que en la actualidad se engloban bajo el nombre de «fermiones» en su honor. Son las partículas que se rigen por el principio de exclusión de Pauli, según el cual, por ejemplo, dos electrones pertenecientes a un mismo átomo no pueden encontrarse en el mismo estado electrónico cuántico. Las partículas que no se rigen por este principio se denominan «bosones». Entre los fermiones, tenemos los electrones y los muones, y los protones, los neutrones y las partículas lambda. La formulación probabilística que permiten expresar matemáticamente los estados e interacciones de las partículas subatómicas pasó a llamarse «estadística de Fermi-Dirac», nombre compuesto debido a que fue desarrollada por ambos físicos, aunque de forma independiente. Gracias a este trabajo, Fermi fue contratado por la Universidad de Roma.

El Proyecto Manhattan

A su alrededor se formó una escuela de grandes físicos, entre los que cabe incluir a Emilio Segrè o Ettore Majorana. A final de la década de 1920, Fermi ya estaba reconocido como el físico más destacado de Italia, y Benito Mussolini le correspondió ofreciéndole un puesto en la Academia de Italia. En esa época decidió estudiar física nuclear, e hizo importantes contribuciones en la comprensión de la desintegración beta. En 1938, sus experimentos sobre la radiactividad artificial le reportaron el premio Nobel de Física, lo que le sirvió de pretexto para emigrar a Estados Unidos huyendo de la Italia fascista. En 1942 logró producir por primera vez una reacción nuclear en cadena. Con ello, se habían puesto las bases para la creación de una bomba nuclear, en cuya fabricación, el Proyecto Manhattan, también tomó partido. Enrico Fermi murió de cáncer en Chicago, en 1954.

elementos radiactivos producidos por procesos de irradiación con neutrones y por sus descubrimientos sobre las reacciones nucleares debidas a los neutrones lentos».

UN PROBLEMA DE FÍSICA Y OTRO DE QUÍMICA

El interés en ese momento estaba en sintetizar elementos transuránicos y conocer exactamente los procesos físicos que tenían lugar en el interior del núcleo atómico. Meitner tenía claro que necesitaba la colaboración de un experto en radioquímica, y el más adecuado para unirse a su investigación era Otto Hahn. Aunque ya habían transcurrido muchos años desde que juntos hallaran el protactinio, el estudio que Meitner quería abordar ahora justificaba que volvieran a reunirse:

> Encontré estos experimentos tan interesantes que tan pronto como fueron apareciendo en *Nuovo Cimento* y en *Nature* hablé con Otto Hahn sobre reanudar nuestra colaboración directa, después de una interrupción de años, con la finalidad de resolver estos problemas.

Sin embargo, Hahn solamente aceptó el reto de investigar el uranio a raíz de una controversia paralela. El físico alemán Aristide von Grosse (1905-1985) planteó la hipótesis de que uno de los elementos detectados por Fermi, tras someter uranio al bombardeo de neutrones, fuera el protactinio. Esto, por otro lado, vendría a desmentir la existencia de elementos transuránicos, dado que el protactinio —número atómico 91— tenía un número atómico menor que el uranio. Hahn quiso averiguar de forma prioritaria si esto era así, de modo que acabó interesándose por el mismo problema que Meitner, aunque por razones distintas.

Además de este grupo de investigación, formado en Berlín para estudiar el uranio, surgió otro, esta vez en París y formado por Irène Curie y Frédéric Joliot, de modo que se estableció una dura competencia. En Berkeley, a su vez, también se creó un grupo de trabajo con la misma finalidad. El uranio parecía esconder importantes novedades y todos querían ser los primeros en descubrirlas.

En relación al uranio, estos investigadores tuvieron que enfrentarse a la evidencia de que algunas piezas no encajaban. Más tarde acabaron comprendiendo que las incoherencias con las que se encontró la investigación eran de tipo fundamental, se debieron a dos asunciones erróneas que se usaban para interpretar los datos obtenidos en los experimentos.

> «Después de la aparición de los artículos de Fermi, salió a la luz un artículo de Von Grosse y Agruss, según el cual no era en absoluto cierto que las actividades de Fermi se refirieran al elemento 93, sino que era más que probable que se tratara del elemento 91: ekatantalio [protactinio]. Después de estas publicaciones, L. Meitner y yo decidimos repetir los experimentos de Fermi y comprobar las asunciones de Grosse.»
>
> — Otto Hahn.

En primer lugar, se tenía la creencia que el bombardeo con neutrones no debía representar un fuerte impacto en la estructura del núcleo atómico. Se creía que la mayor consecuencia sería la eyección de una partícula alfa. Era una idea basada en la teoría del efecto túnel de George Gamow.

Usando los postulados de la física cuántica, Gamow había llegado a la conclusión de que solo partículas pequeñas —como las que se producían en la desintegración alfa— podían atravesar la barrera energética nuclear y escindirse del núcleo. De forma sucinta, el efecto túnel explicaba, por ejemplo, cómo una partícula subatómica es capaz de superar la barrera de potencial que la une a un átomo y liberarse a pesar de no tener suficiente energía cinética para hacerlo según las consideraciones de la física clásica.

La física alemana Ida Noddack (1896-1978) había sido la única que había planteado serias dudas respecto a la idea de que solo partículas pequeñas podían escapar del núcleo. Noddack, que se había labrado cierto prestigio al descubrir el elemento renio —y por lo que fue nominada al premio Nobel en varias ocasiones,

sin serle otorgado—, se mostró crítica con Fermi, dado que creía que los núcleos atómicos podían dividirse en «fragmentos de diferentes tamaños, que serían por supuesto isótopos de elementos conocidos, pero que no se encontrarían en las proximidades de los elementos irradiados». Para Noddack, Fermi no había sido capaz de demostrar que se debía descartar por completo que los supuestos elementos transuránicos no fueran elementos conocidos. Con esto, fue la primera científica en apuntar la noción de la fisión nuclear, aunque lo hizo sin corroborar esta intuición con

GAMOW Y EL EFECTO TÚNEL

Uno de los problemas que planteaba la radiactividad y los procesos de desintegración nucleares era la gran cantidad de energía necesaria para provocarla. Por un lado, la carga eléctrica de los protones del núcleo supone la presencia de un campo electrostático, de modo que partículas incidentes de carga positiva pueden sufrir fuertes fuerzas de repulsión en las proximidades del núcleo. Por otro lado, también estaba presente —aunque en ese momento no se tenía conocimiento de ello— la fuerza nuclear fuerte, que es la que hace que los nucleones —protones y neutrones— se mantengan unidos entre sí. En 1928, el físico y astrónomo ucraniano George Gamow (1904-1968) conjeturó que aplicando los principios de la física cuántica, era posible derivar que, en realidad, había partículas que podían desligarse del núcleo sin que fuera necesaria tanta energía como pronosticaba la física clásica. En este sentido, el historiador de la ciencia Spencer Weart explica:

> La teoría nuclear en la década de 1930 era una incipiente y agitada burbuja de ideas que avanzaba tomando de aquí y allá resultados experimentales o ecuaciones plausibles. No había muchos puntos de contacto sólidos con la realidad, ni muchos procesos experimentales que se pudieran calcular realmente mediante la teoría.

Para este historiador, el primer éxito llego con la teoría de la desintegración de la partícula alfa de George Gamow. Imaginó que el «núcleo no era nada más que un pozo de potencial con partículas como si estuvieran en el interior de una bolsa». Las partículas alfa, por tanto, eran capaces de atravesar la superficie de la bolsa «mediante un [proceso llamado] túnel» (véase la figura). Para Weart, era una explicación satisfactoria y que «impresionó profundamente a los físicos». Pero tuvo como contrapartida el hecho de inhibir aquellas formas de pensar que «pudieran conducir a la comprensión de que el núcleo puede dividirse por la mitad». Es decir, según este autor, esta teoría impidió que los

experimentos, de modo que ninguno de sus colegas la tomó en consideración.

La segunda de las teorías que contribuyó a dificultar la elucidación de los procesos que tenían lugar tras el bombardeo del uranio procedía de la química. Para los químicos, los elementos más allá del uranio tenían que guardar semejanzas de comportamiento químico con los elementos que se encontraban en la tercera fila de los elementos de transición, donde se encontraban el renio (Re), el osmio (Os) o el iridio (Ir). Por esa razón, los elementos

científicos se plantearan tan siquiera la fisión, la división del núcleo atómico. De nuevo en palabras de Weart:

> Desde el principio, la teoría de Gamow dejaba claro que los fragmentos nucleares que fueran solo ligeramente más grandes que la partícula alfa tendrían dificultades para deslizarse a través de la barrera de potencial. [...] Esta representación estaba firmemente incrustada en las mentes de los físicos nucleares, y en particular en el grupo de Berlín.



Aunque la teoría del efecto túnel permitió entender cómo se producía la desintegración alfa, dificultó que los científicos de la época concibieran la posibilidad de la fisión nuclear.

que supuestamente se encontrarían más allá del uranio recibieron el nombre provisional de ekarenio o ekaosmio, entre otros. De esta manera, podían predecir las características que iban a tener dichos elementos y guiarse en su búsqueda. Se trataba de nuevo de una premisa incorrecta, porque en realidad tales elementos forman parte de lo que hoy llamamos lantánidos, y también se los denomina «tierras raras». Con ello se hacía una asunción arriesgada, al no tener en cuenta que tales elementos podían formar parte de un grupo de transición, lo que se tradujo en que todas las investigaciones se centraron en estudiar las propiedades químicas en relación a los elementos de transición, en lugar de tratar de buscarlos como otro tipo de elementos.

Las dos ideas se complementaban y creaban unas expectativas muy concretas en sus características que los científicos solo debían ser capaces de confirmar con sus experimentos. Como se verá, hubo que desechar estas hipótesis equivocadas para que finalmente pudieran comprenderse los resultados experimentales. Además, era necesario aislar e identificar tales elementos, y comprobar su peso atómico. Se tenía el convencimiento de que los elementos transuránicos existían, pero había que dar con ellos.

HAHN, MEITNER Y STRASSMANN

Tal como ya había hecho Fermi, Meitner buscó disponer de una fuente de neutrones para sus experimentos y para ello optó por berilio sometido a la radiación gamma procedente del radio. Sin embargo, los neutrones emitidos no reaccionaban por igual con todos los elementos.

Los elementos relativamente pesados, como el oro o la plata, absorbían los neutrones. Pero no ocurría lo mismo con los elementos ligeros, como el sodio o el aluminio. Meitner estableció que tenía que haber una relación entre la energía cinética de los neutrones —baja, debido a una velocidad lenta— y los procesos de absorción de neutrones. Este tipo de neutrones, lentos, se co-

LA ABSORCIÓN DE NEUTRONES

Cuando se bombardean átomos con neutrones, puede que se produzca la absorción de los neutrones por parte de los núcleos. Esto puede desencadenar diferentes tipos de reacciones nucleares, tal como establecieron Fermi, los Joliot-Curie, o el equipo berlinés formado por Meitner, Hahn y Strassmann. La absorción provoca, por ejemplo, una desintegración tipo beta, con la consecuente transmutación en cuanto a elemento químico. Otras posibilidades, tal como Fermi pudo mostrar, son la eyección de un protón o una partícula alfa. Todos estos procesos fueron observados con el bombardeo del uranio-238, que es el isótopo más común del uranio. Al someterlo a un haz de neutrones, un núcleo de uranio-238 absorbe un neutrón, y pasa a ser uranio-239. Se desencadena una desintegración tipo beta, lo que puede expresarse según la notación siguiente:

$$(n, e^-).$$

En la izquierda (n, neutrón) se indica la partícula que provoca el proceso de desintegración y a la derecha se especifica la partícula eyectada —la radiación beta consiste en la emisión de electrones, representado con e^-—. Cuando se trata de una desintegración beta, eso implica que hay una reacción nuclear interna intermedia por la que un neutrón se ha transformado en un protón y un electrón —conservación de la carga—, donde esta última partícula acaba escapando del núcleo. El núcleo pasa a tener 93 protones —uno más de los que tiene el uranio—, lo que corresponde con el elemento que denominamos neptunio-293. Este elemento también se descompone mediante otra desintegración beta, obteniéndose finalmente plutonio-239. El plutonio se caracteriza por estar formado por 94 protones. En esta sucesión de procesos, el átomo pasa a perder o ganar uno o varios protones, de modo que el elemento final siempre se encuentra situado en posiciones próximas en la tabla periódica respecto al elemento original. Al proponer la fisión nuclear, Meitner abrió con su concepción un campo de posibilidades con transformaciones nucleares mucho más radicales.

nocen como «neutrones termales». Fermi descubrió que podía aminorar su velocidad antes de la colisión con el blanco haciendo que en su desplazamiento chocaran con alguna sustancia que contuviera hidrógeno, como es el caso de la parafina. Al sumergir la fuente de neutrones en parafina —o también el objeto del bombardeo con neutrones—, se reducía considerablemente la velocidad

de los neutrones debido a las colisiones en su trayectoria. Una menor energía cinética incidente debería alterar el tipo de reacción nuclear que se provocaría. Meitner y Hahn lograron distinguir entre neutrones termales y rápidos en octubre de 1934, simultáneamente a Fermi.

Para tratar de hallar los elementos transuránicos, Hahn y Meitner primero irradiaban uranio con neutrones. Dado que se obtenían concentraciones muy pequeñas de los elementos radiactivos puros en solución, y en la época no existían los conocimientos para hacerlos precipitar, recurrían entonces a un portador, una sustancia químicamente semejante al producto obtenido y que permitía arrastrarlo para completar la operación de precipitación. Finalmente, era necesario separar la sustancia original del portador.

Debido a la convicción de que el transuránico que estaban estudiando guardaba similitudes con este elemento, el equipo berlinés usó renio como portador, y con ello obtuvieron ciertos resultados congruentes. Sin embargo, también detectaron productos de otros procesos inesperados, y no disponían de ningún modelo que permitiera encajar esos resultados. Todavía no eran capaces de averiguar qué elemento era el que esas emisiones beta producían.

Fue un trabajo muy duro en el que invirtieron varios años. En 1935, se unió al equipo Fritz Strassmann. No recibía salario alguno, pero tampoco encontraba ninguna otra oportunidad debido a que no simpatizaba con la ideología nazi. En ese sentido, los tres científicos compartían su oposición al régimen, de modo que Meitner, que de por sí estaba directamente amenazada, pudo contar con el respaldo y protección de sus colegas. Finalmente, llegaron a hacer público el resultado de su investigación, en la que se mostraban las dos desintegraciones beta encadenadas que se producían en el uranio. Más tarde, pudo identificarse un tercer proceso de desintegración que, a diferencia del anterior, no daba lugar a una larga cadena de desintegraciones (figura 6).

En los dos primeros procesos, Hahn pudo identificar que las propiedades de los elementos de las series de desintegración encajaban con las predicciones en cuanto a transmutación química

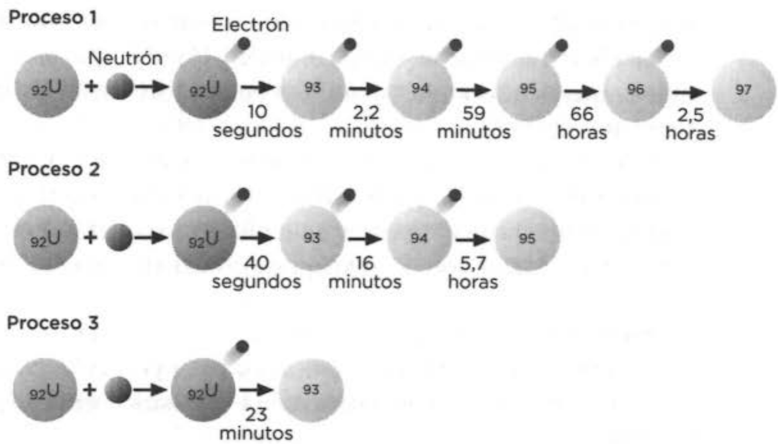


FIG. 6

de los elementos, obteniendo elementos que respectivamente se asemejaban al renio, al osmio y al iridio. Todo parecía indicar que seguían una secuencia correcta. La existencia de los elementos transuránicos se daba ya por confirmada, e incluso desde Roma se propusieron ya algunos nombres para bautizarlos, como Ausonio y Hespesio. En un artículo cuyo autor principal era Hahn, se expresaba así:

> En general, la conducta química de los transuránicos [...] es tal que su posición en el sistema periódico ya no se pone en duda. Por encima de todo, el hecho de ser químicamente distintos del resto de elementos conocidos con anterioridad no necesita mayor discusión.

Meitner, como física y líder del equipo, y Hahn como químico, se complementaban para abordar todas las cuestiones surgidas en el estudio del uranio. En el trabajo de Meitner tenían un gran peso los resultados y los análisis aportados por la química. Si el análisis químico indicaba que una sustancia había precipitado o que se había detectado una sustancia radiactiva, era una

confirmación clara de la determinación del elemento químico. Meitner, por su lado, tenía que lidiar con un modelo teórico para encajar todos esos procesos. Y a partir de los resultados encontrados, había numerosos aspectos que le despertaban dudas, como, por ejemplo, que tanto los neutrones termales como los neutrones rápidos desencadenaran por igual cualquiera de los dos tipos de desintegración. Había además otros asuntos que no estaban resueltos, tal como expuso la propia Meitner años más tarde:

> Siempre estaba infeliz sobre ello porque no podía entender cómo puede el número atómico continuar aumentando con la misma masa. Esto es lo que seguí preguntándole a Weizsäcker [uno de sus ayudantes en esa época]. ¿Cómo era posible? ¿Ves? Nunca estuve satisfecha con nuestros experimentos antes de la fisión.

BAJO LA AMENAZA NAZI

Mientras Hahn y Meitner estaban realizando sus investigaciones, los signos de degradación de la convivencia en la sociedad alemana eran cada vez más palpables. El ideario nazi se estaba extendiendo y consolidando en todas las capas de la sociedad, y la presión contra los judíos era cada vez más manifiesta y explícita. Meitner no se veía afectada por las leyes que coartaban los derechos de los judíos alemanes. No solo había mantenido su nacionalidad austriaca, sino que además contaba con muy buenos e influyentes amigos, entre los que destacaba Max Planck, que la defendía para que pudiera mantener su puesto en el instituto. Prueba de ello, el legendario físico, quien dirigió la Sociedad Kaiser Wilhelm desde 1930 hasta 1937, aprovechó el cargo para proponer a Meitner para el premio Nobel en varias ocasiones. Fue la candidata de Planck para el Nobel de Química, por ejemplo en 1936, año en el que Heisenberg también la propuso para el Nobel de Física. Planck discutió con el físico alemán Max von Laue (1879-1960) su solicitud de premio Nobel para Meitner en estos términos:

> Estoy a favor de proponer a la señorita Meitner para el premio Nobel. Ya lancé esta propuesta el año pasado, con la sugerencia de dividir el crédito entre Hahn y Meitner para el premio de Química de 1936. Pero también estaría de acuerdo con la propuesta que he hablado con el señor Heisenberg.

Sin duda, este premio le hubiera proporcionado un mayor renombre internacional y cierta seguridad, posiblemente evitando parte de las penurias que más tarde tuvo que sufrir.

EL DESCUBRIMIENTO DE LA FISIÓN

En 1936, Bohr, junto a otros colaboradores, lanzó la teoría del núcleo atómico entendido como una gota de agua, a la que ya hemos hecho referencia. Ahora podemos saber que tenían ya casi todas las piezas sobre la mesa, pero la solución del rompecabezas se les resistía. Respecto a los análisis químicos, se limitaron a investigar la química de los elementos de transición, en lugar de ampliar la búsqueda a otros elementos. Meitner explicó los errores que cometieron en ese sentido de la siguiente manera:

> Durante las radiaciones con neutrones rápidos, nuestras precipitaciones se hacían siempre de tal manera que el uranio, el paladio y el torio permanecían en el filtrado, lo que apoyaba la naturaleza transuránica de los elementos precipitados. Por esta razón —y este fue nuestro error—, durante un tiempo nunca examinamos el filtrado después de la precipitación, ni tampoco cuando lo intentamos con neutrones lentos.

La angustiosa presión para obtener resultados relevantes se hacía patente en el clima competitivo que se creó con el equipo de París. En 1935, Meitner y Hahn realizaron algunos experimentos bombardeando torio con neutrones, dando lugar de nuevo a desintegraciones beta encadenadas. Este descubrimiento fue posteriormente obtenido por los Joliot-Curie, aunque en el artículo que publicaron no citaron ni a Hahn ni a Meitner. Para Meitner, no se

trataba solo de prestigio, sino casi de supervivencia, dado que su situación laboral pendía de un hilo. Tal como explicó Hahn en una carta, lamentaban la omisión de Irène Curie, dado que «nunca ha sido tan necesario obtener eco por nuestra labor científica como en la actualidad».

En ese momento, Irène Curie realizó un descubrimiento crucial. En 1938, y con la ayuda de un colaborador llamado Pavel Savitch, Curie bombardeó uranio con neutrones termales, y entre los productos resultantes detectaron una actividad que había pasado desapercibida hasta ese momento correspondiente a una semivida de 3,5 horas. En un primer momento, creyeron que se encontraban ante un isótopo del torio que recibió en principio el nombre de «kuriosum». Para el equipo berlinés, este resultado era chocante e inexplicable, tal vez fruto de algún error. Según Meitner, los neutrones lentos en ningún caso podían producir torio al impactar con el uranio. Reprodujeron el experimento tratando de detectar torio entre los productos, pero no lo encontraron. Tras este resultado, Meitner se puso en contacto con Curie para que retractara su resultado, aunque, tal como se lamentaría Meitner más tarde, si hubieran buscado el proceso con un tiempo de desintegración de 3,5 horas, todo hubiera podido ser diferente.

En ese punto, Meitner se vio obligada a escapar de Berlín a toda prisa para evitar ser arrestada por la policía. En octubre de 1938 Hahn y Strassmann siguieron analizando los resultados en relación al trabajo de Curie, pero esta vez se encontraron con la sorpresa de que tenía que tratarse de un isótopo del radio. Si para Meitner ya era inconcebible que un neutrón termal pudiera provocar que se desprendiera una partícula alfa del núcleo, era del todo imposible que lo hicieran dos partículas —recordemos que el uranio tiene cuatro protones más que el radio—.

En noviembre de 1938 se produjo un crucial encuentro para discutir los experimentos entre Lise Meitner, Otto Hahn y Niels Bohr en el Instituto de Física Teórica que este último dirigía en Dinamarca. Fue una reunión mantenida en secreto, dado que Hahn tenía que ser muy cuidadoso con los pasos que daba para no ser acusado de traidor, y que lo apartaran de su cargo. En este en-





FOTO SUPERIOR:
Meitner en 1959 debatiendo distendidamente con unas estudiantes en el Bryn Mawr College de Pensilvania, Estados Unidos.

FOTO INFERIOR:
En 1962, Otto Hahn (centro), Fritz Strassmann (izquierda) y Heinz Haber reconstruyeron en el Museo de Múnich el experimento de fisión nuclear de 1938.

cuentro, Meitner insistió en que no podía tratarse de radio, por lo que era necesario seguir investigando respecto a la naturaleza de ese elemento. Tal como explicó Strassmann posteriormente:

> Afortunadamente, las opiniones y juicios de Meitner tenían tanta importancia para nosotros, que empezamos enseguida los experimentos de control.

Usaron como portador el bario para conducir el proceso, dado que el radio y el bario pertenecen al mismo grupo de la tabla periódica y comparten ciertos comportamientos en base a sus propiedades químicas. Para su sorpresa, su intento de separar el bario usado como conductor del radio fracasaron: solo había bario. Este experimento crucial se realizó entre el 16 y el 17 de diciembre de ese año. El resultado era asombroso, dado que obligaba a pensar que el impacto del neutrón rompía en dos mitades el núcleo de uranio. Esto generó el intercambio de cartas relatado en el primer capítulo. Meitner y su sobrino Otto Frisch propusieron la fisión nuclear del átomo basándose en el modelo de la gota de agua de Bohr para el núcleo.

EL ESCLARECIMIENTO DE LOS PROBLEMAS

Hahn y Strassmann publicaron el resultado de su experimento con el uranio el 6 de enero y el 10 de febrero en la prestigiosa revista *Naturwissenschaften*. Meitner no firmó dicho trabajo por no encontrarse ya en Berlín, pero sobre todo por temor a que su nombre pudiera poner en peligro a los otros dos investigadores. Meitner y Frisch, por su parte, el 11 de febrero de 1939 publicaron en la revista *Nature* la noción de la fisión nuclear y los procesos físicos en los que se basaba.

Por fin, ya habían comprendido los resultados experimentales que habían ido encontrando a lo largo de esos años. Por un lado, de los tres procesos que habían distinguido, solo en el tercer caso, con la cadena de reacciones inducida más corta, realmente se producía un elemento transuránico estable. Dicho elemento pudo ser

EL ARTÍCULO SOBRE LA FISIÓN

Meitner y Frisch publicaron su descubrimiento sobre la fisión nuclear en la revista *Nature* a principios de 1939. Con el título «Desintegración de uranio por neutrones: un nuevo tipo de reacción nuclear» y firmado solo por Lise Meitner y Otto Frisch, el artículo comenzaba reconociendo que era un trabajo que seguía la estela de Enrico Fermi:

> Al bombardear uranio con neutrones, Fermi y sus colaboradores encontraron que se producían como mínimo cuatro sustancias radiactivas, y a dos de ellas se le adscribió un número atómico mayor que 92.

Posteriormente se citaban las observaciones de Hahn y Strassmann, así como de los Joliot-Curie. Y también apuntaba al dato experimental crucial:

> Hahn y Strassmann se vieron obligados a concluir que isótopos de bario ($Z = 56$) se forman como consecuencia del bombardeo de uranio ($Z = 92$) con neutrones [...] A primera vista, este resultado parece difícil de entender. La formación de elementos muy por debajo del uranio había sido considerada anteriormente, pero siempre se había rechazado por razones físicas». [...] En la discusión de las energías involucradas en la deformación del núcleo, se ha usado el concepto de tensión superficial de la materia nuclear y su valor ha sido estimado. [...] la tensión superficial del núcleo decrece al incrementar el número atómico. [En grandes átomos, como el caso del uranio, la tensión superficial es menor, de modo que] es concebible pensar que el núcleo del uranio, con una baja estabilidad en la forma, puede dividirse en dos núcleos de aproximadamente el mismo tamaño después de la captura de un neutrón. [Los dos átomos se emitirán con una] energía cinética total de aproximadamente 200 MeV [...].

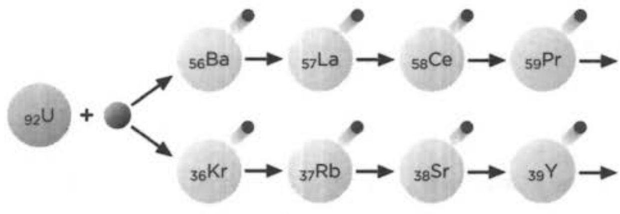
La publicación de este artículo representó la resolución de las cuestiones que habían tenido absortos a estos científicos durante alrededor de cuatro años. El artículo marcó un hito en la investigación sobre la radiactividad.

detectado en 1940, y recibió el nombre definitivo de neptunio. Es decir, había una parte de verdad en afirmar la existencia de los elementos transuránicos.

Sin embargo, lo que había provocado todas las dudas residía en los otros dos procesos encontrados en paralelo. Para Meitner, no tenía sentido que un impacto de neutrón provocara cadenas de desintegraciones beta tan largas. Ahora, por fin, podían entender

Gracias a la idea de la fisión, lo que en un principio se había interpretado como dos procesos distintos, se pudo entender que formaba parte de un único proceso.

FIG. 7



que en realidad esas cadenas se producían cuando el uranio se escindía en dos fragmentos grandes correspondientes a dos elementos distintos (figura 7). Para tornarse estables, en cada uno de los dos fragmentos se producían respectivas cadena de desintegraciones, que eran las que habían captado a lo largo de esos años.

CAPÍTULO 5

La reacción en cadena

Producto del proceso de la fisión nuclear se liberan neutrones que se pueden usar para provocar nuevas escisiones de los núcleos atómicos. El número de eventos de fisiones nucleares en cadena tiene un crecimiento exponencial, y su capacidad de generar grandes cantidades de energía puede resultar terriblemente destructora cuando toma la forma de la bomba atómica.

En la fisión nuclear, además de la escisión del núcleo de uranio, ¿se liberan neutrones? No era una cuestión descabellada, dado que, en cierto modo, el uranio contiene en su núcleo un exceso de estas partículas neutras. En la respuesta se encontraba la clave sobre si el proceso de fisión podría utilizarse para producir energía. Para el científico de origen húngaro Leó Szilárd (1898-1964), esta cuestión estaba vinculada con la bomba atómica.

LOS NEUTRONES Y LA REACCIÓN EN CADENA

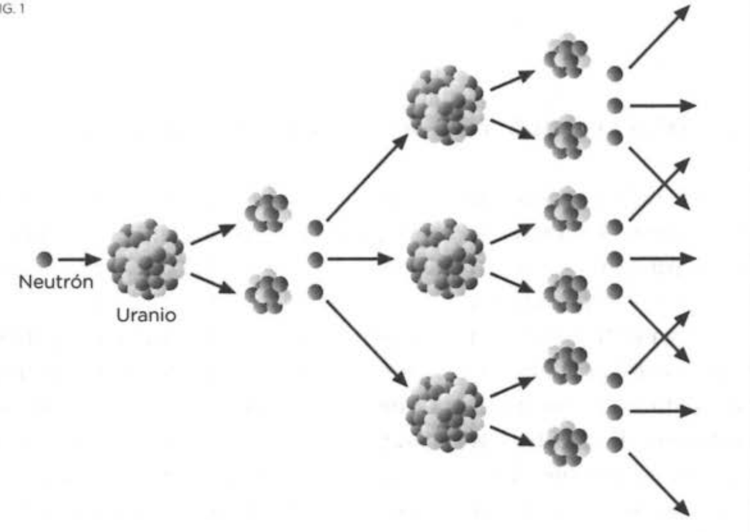
Szilárd había estado dando vueltas a la idea de la reacción en cadena desde hacía años. Ya en 1934 patentó esta idea, aunque todavía no sabía cómo podría llevarse a la práctica. Proponía, por ejemplo, que para llevar a cabo esta reacción se usara berilio. Lo más importante es que mediante la reacción en cadena implicada, a partir de los procesos atómicos se podían conseguir grandes cantidades de energía. Sin embargo, numerosos miembros de la comunidad científica de aquel momento rechazaron la idea de que esto fuera posible. En 1938, Szilárd emigró a Estados Unidos y allí pudo empezar a trabajar en la investigación sobre la fisión en base a ese objetivo.

Niels Bohr llegó al puerto de Nueva York a principios de 1939 sabedor del extraordinario descubrimiento de la fisión debido a que Otto Robert Frisch había tenido ocasión de explicarle los detalles del proceso justo antes de zarpar. Enrico Fermi —que había llegado poco antes a Estados Unidos, huyendo de la dictadura de Mussolini, y tras recoger el premio Nobel de Física en 1938— lo había ido a recibir al puerto, de modo que nada más llegar le puso al corriente de la extraordinaria noticia. Fermi quiso observar de inmediato si podía replicar el experimento de la fisión, de modo que en la Universidad de Columbia, donde estaba trabajando, usaron el ciclotrón para acelerar los protones con los que bombardear muestras de uranio. Los osciloscopios pronto empezaron a mostrar la señal, como indicación de que efectivamente se estaba produciendo la fisión (figura 1).

Poco después, Bohr y Fermi se trasladaron a la Universidad George Washington para asistir a una conferencia sobre física

El concepto de la reacción en cadena presuponía que tras la escisión del núcleo de un átomo se liberan neutrones que son potencialmente capaces de provocar la fisión de otros tantos átomos. Cada uno de ellos de nuevo liberaría nuevos neutrones, de modo que el número de escisiones crecería según una secuencia exponencial.

FIG. 1



teórica. El tema estrella iba a ser la fisión. En una de las intensas conversaciones que tuvieron lugar en este evento, Bohr planteó la cuestión crucial: ¿y si durante la fisión se liberaban neutrones? Esto posibilitaría que tras la escisión de un núcleo de uranio se pudiera acabar produciendo una reacción en cadena.

LA CARTA DE EINSTEIN

Debido a estas expectativas, un grupo se puso a estudiar durante la fisión si se producía realmente la emisión de neutrones. A principios de 1939, en uno de los laboratorios de la Universidad de Columbia, Szilárd y el físico de origen canadiense Walter Zinn (1906-2000) detectaron por lo menos dos neutrones —aunque posteriormente se supo que en la fisión del uranio-235 se desprenden hasta tres neutrones—. Esto significaba, tal como concluyeron, que el uranio podía servir para iniciar y sostener una reacción en cadena, lo que a su vez abría la posibilidad de que se generaran enormes cantidades de energía. Szilárd relató posteriormente este descubrimiento crucial:

> Todo el mundo estaba listo. Solo debíamos girar un botón y contemplar, instalados cómodamente en nuestros sillones, una pantalla catódica: si allí distinguíamos un centelleo, sabríamos que la liberación de energía atómica en gran escala era inminente. Giramos el botón y el centelleo apareció en la pantalla. Contemplamos esos chispazos un momento y después cada uno regresó a su casa. Esa tarde quedé convencido de que el mundo se precipitaba hacia su perdición.

Los neutrones eyectados, producto secundario de la fisión nuclear, eran la prueba de que se podía construir la bomba atómica de forma más o menos inminente. Más adelante, Fermi y Herbert Anderson llegaron a comprender que para producir una reacción en cadena sostenida era necesario usar tanto uranio como agua. Algunas de estas conclusiones se publicaron en la revista *Physical Review*.

Simultáneamente, distintas universidades y centros de investigación de Estados Unidos y de Europa —en concreto, investigadores como los Joliot-Curie— también habían logrado llevar a cabo procesos de fisión. Szilárd estaba convencido de que era cuestión de tiempo que el ejército alemán se pusiera a trabajar en ello. Sin duda, contaban con científicos más que preparados para conse-

OTTO ROBERT FRISCH

Nacido en Viena, hijo de la pianista Auguste Meitner —hermana de Lise Meitner— y del pintor Justinian Frisch, Otto Robert Frisch (1904-1979) se doctoró en la Universidad de Viena en 1926. Se trasladó a Hamburgo, donde fue ayudante del físico alemán Otto Stern (1888-1969), con quien en 1933 lograría medir el momento magnético del protón. Ese mismo año Hitler llegó al poder, por lo que optó por emigrar de Alemania. Recaló en Londres, y seguidamente se unió al instituto de Bohr en Copenhague, donde estuvo cinco años. En 1938, ayudó a su tía Lise a entender el proceso de la fisión nuclear y también aportó la idea de denominar este proceso como fisión, inspirándose en un término usado en la biología. A partir de ese momento, todos sus esfuerzos se centraron en investigar la fisión y la reacción en cadena. En 1939 se trasladó de Copenhague hasta Birmingham en lo que tenía que ser un viaje breve, pero el estallido de la guerra le obligó a cambiar sus planes. Junto con el físico británico Rudolf Peierls (1907-1995) escribió el memorándum Frisch-Peierls, que por primera vez establecía cómo se podía provocar una explosión atómica mediante la fisión nuclear. Posteriormente, este memorándum se usó en el desarrollo del Proyecto Manhattan, en el que él mismo tuvo una participación muy activa como parte integrante de la delegación británica. Su tarea en Los Álamos consistió en determinar la cantidad de uranio necesaria para lograr una reacción en cadena. Frisch cuenta, por ejemplo, que hubo un momento en el que logró iniciar una reacción en cadena que tuvo que detener con sus propias manos, apartando las barras de uranio, porque de otro modo hubiera desencadenado una detonación. En 1946, Frisch regresó al Reino Unido, donde se dedicó a impartir clases en Cambridge y también le fue asignado el cargo de jefe de física nuclear en el Centro de Investigación de Energía Atómica en Harwell. Falleció en 1979.

«Informa a Cockcroft y a Maud Ray Kent»

Mientras Frisch estaba en el Reino Unido desarrollando sus ideas en torno a hacer posible la construcción de una bomba atómica, recibió un telegrama de Meitner cuyo contenido le había dictado Bohr. Sus últimas palabras decían: «[...] *and please inform Cockcroft and Maud Ray Kent*». Frisch estaba seguro

guirlo. Era imprescindible que el Gobierno estadounidense diera impulso a un gran proyecto para desarrollar la bomba, pues de lo contrario, los alemanes dispondrían de una ventaja difícil de superar y que les permitiría doblegar al resto de países en la contienda.

Fermi, galardonado recientemente con el premio Nobel de Física en 1938, y muy implicado en el estudio de la fisión, pare-

de que Bohr le pedía que pasara algún tipo de información codificada a la comisión atómica británica, que había empezado a reunirse en esa época, pero no fue capaz de descifrar de qué podía tratarse. Por otro lado, Cockcroft era el físico que había construido el acelerador de partículas en 1932 en Cambridge. De modo que toda la incógnita se concentró en la expresión «Ray Kent». Podía esconder un anagrama (como «radium taken», es decir, «radio tomado»), pero no podía estar seguro. Se convenció de que Bohr estaba usando algún tipo de código secreto que ni él ni los de la comisión acertaron a descifrar. Finalmente, la comisión atómica adoptó el nombre de Comité MAUD —que también es un acrónimo en inglés de Aplicaciones Militares de la Detonación del Uranio—. Más tarde se supo la verdad: Maud Ray era el nombre de la niñera de los hijos de Bohr. Como estaba viviendo en Kent, Bohr simplemente quería transmitirle recuerdos.



Otto Robert Frisch en 1945, tocando el piano en la KRS, la emisora de radio de Los Álamos, Nuevo México.

cía la persona más adecuada para transmitir al Gobierno estadounidense las preocupaciones de la comunidad científica sobre la intención de producir una bomba atómica. En 1938 se encontró con algunos representantes del ejército, pero la reunión fue un fracaso. Tuvo que aclarar que sus razonamientos eran especulaciones y además su escaso dominio del inglés no contribuyó a que resultara más convincente. Había que insistir, por lo que esta vez Szilárd pensó en recurrir a Albert Einstein, su antiguo profesor en la universidad y una de las figuras científicas más reputadas del momento. Einstein era además un destacado pacifista, por lo que su iniciativa se tomaría aún más seriamente. Szilárd se encontró con Einstein —que se hallaba en una casa de verano— para explicarle el problema. Einstein no estaba al corriente de los avances sobre la fisión y la reacción en cadena, de modo que Szilárd tuvo que ponerle al día.

«Es terrible, hemos hallado los neutrones.»

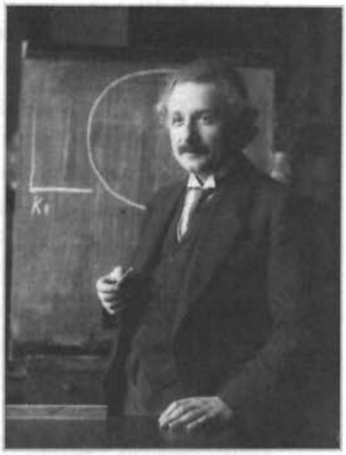
— Leó Szilárd.

El 9 de agosto, Einstein escribió una carta dirigida al presidente Roosevelt, en la que se señalaban los peligros de que Alemania desarrollara la bomba atómica. Estados Unidos tenía que hacer todos los esfuerzos posibles por adelantarse. «Tengo entendido que Alemania actualmente ha detenido la venta de uranio de las minas de Checoslovaquia, que han sido ocupadas», advertía Einstein al final de la carta. El embargo del uranio era un claro indicio de que los alemanes estaban desarrollando algún tipo de proyecto militar. Pero a pesar de que recibió una respuesta rápida del propio presidente indicando que estudiarían el problema con atención, en realidad el Gobierno siguió ignorando las advertencias de la comunidad científica.

Lo que tampoco podían imaginar ni Szilárd ni el propio Einstein eran las sospechas que la figura del creador de la teoría de la relatividad despertaba entre los servicios secretos estadounidenses. En un informe del FBI, desclasificado décadas después, se puede leer: «A la vista de su historial radical, esta oficina no re-

EINSTEIN ESCRIBE A ROOSEVELT

9 de agosto de 1938



F.D. Roosevelt, presidente de Estados Unidos
Casa Blanca, Washington, D.C.

Señor:

Investigaciones recientes [...], que se me han comunicado en forma de manuscrito, me hacen suponer que el elemento uranio se pueda convertir en una nueva e importante fuente de energía en un futuro inmediato. Ciertos aspectos de la situación que se ha creado parecen exigir vigilancia, y si fuera necesario una rápida acción por parte de la administración.

En el curso de los últimos cuatro meses [...] podría resultar viable provocar una reacción nuclear en cadena en una gran masa de uranio, mediante la cual se generarían enormes cantidades de energía y grandes cantidades de nuevos elementos similares al radio [...].

Este nuevo fenómeno conduciría también a la fabricación de bombas y cabe concebir —aunque aquí la certeza sea menor— que de este modo se pueda crear un nuevo tipo de bombas, extremadamente potentes. Una sola bomba de esta clase, transportada en barco y detonada en un puerto, muy bien podría destruir el puerto entero y parte del territorio circundante [...].

Sinceramente suyo,
Albert Einstein

comienda el empleo del doctor Einstein en cuestiones de carácter secreto sin antes llevar a cabo una minuciosa investigación, y parece improbable que un hombre con ese historial pueda haberse convertido en tan poco tiempo en un ciudadano norteamericano leal». Después de todo, el informe dejaba claro que Einstein quizá no era el mejor interlocutor para convencer al Gobierno de Estados Unidos.

HEISENBERG Y LA BOMBA

Los alemanes iniciaron sus investigaciones para crear una bomba atómica en 1939, dos años antes que los estadounidenses. Contaban con los científicos e ingenieros más brillantes y preparados, y también tenían a su disposición los materiales (o fuentes) necesarios, como por ejemplo el uranio procedente de las minas de Joachimsthal, en Checoslovaquia. Werner Heisenberg era el científico alemán más destacado de la época, después de Einstein, y parecía también el más capacitado para liderar la realización de la bomba atómica.

Las colaboraciones habituales de Heisenberg con científicos judíos despertaron las suspicacias de los defensores de la «física alemana», movimiento que consideraba que la física desarrollada por judíos era errónea. Johannes Stark, uno de los líderes del movimiento, incluso lo acusó de falta de patriotismo en una publicación. Las SS —sigla de Schutzstaffel, o escuadras de seguridad, la organización militar y policial nazi— decidieron investigarlo y también lo interrogaron. Para Heisenberg, ese fue el peor momento de su vida. Todo se resolvió por la mediación de su madre, que conocía personalmente a la madre de Heinrich Himmler, el comandante en jefe de las SS. De todas formas, a partir de ese momento Heisenberg estuvo siempre bajo sospecha, y por tanto tenía que demostrar constantemente que era todo lo contrario a un traidor.

Cuando en 1939 Heisenberg viajó a Estados Unidos para dar una serie de conferencias en diversas universidades, se daba por sentado que la guerra en Europa era ya inevitable. Por este motivo, recibió ofertas de trabajo de varias universidades, pero las rechazó para retornar a su país. Heisenberg, por tanto, tuvo cierta oportunidad para desvincularse del Gobierno nazi, pero no la aprovechó. Las razones no están claras: pudo regresar principalmente para proteger a su familia, que había permanecido en Alemania, o bien por lealtad a su país. Volvió en un barco semivacío, nadie se aventuraba a regresar a Europa con un conflicto bélico a punto de estallar.

Con el inicio de la guerra, Heisenberg recibió instrucciones del Departamento de Armamento Militar para explorar las posibi-

lidades de la fisión como aplicación militar. En varios informes de 1940 sobre la viabilidad de la fabricación de una bomba atómica, ya estableció los pasos a seguir para desarrollarla. Heisenberg y un numeroso grupo de científicos implicados en el proyecto iniciaron una serie de experimentos, por ejemplo para determinar la absorción de neutrones, elemento considerado clave para el éxito del proyecto. En Berlín, en el Instituto Kaiser Wilhelm de Física —al que se le puso el nombre de «Casa de los Virus» para alejar a los curiosos y muy cercano al instituto de Meitner—, se dispuso una de las sedes donde se iba a construir un reactor nuclear. Cuando, hacia el final de la guerra, los rusos llegaron para invadir Berlín, este edificio se convirtió en uno de sus objetivos militares. Disponer de grandes cantidades de uranio, además de los propios físicos para llevar a cabo la investigación, era imprescindible para que la Unión Soviética pudiera desarrollar posteriormente su propio programa nuclear. Otros centros importantes en la investigación se situaron en Leipzig y también en la pequeña localidad de Haigerloch, en el sur de Alemania, donde los experimentos se realizaron en un agujero debajo de una iglesia.

> «Investigadores que rompen o construyen átomos a voluntad pueden efectuar reacciones explosivas en cadena. Si tales transmutaciones se propagaran en la materia, se puede concebir la enorme energía utilizable que se liberará.»
>
> — Frédéric Joliot, en 1935, en su discurso de aceptación del premio Nobel de Química.

Como no supieron calcular la masa crítica del uranio-235, es decir, la mínima masa de material radiactivo necesaria para producir una reacción nuclear sostenida, acabaron manejando cantidades muy elevadas, de varias toneladas, lo que hacía que la empresa fuera inalcanzable debido a las dificultades para su extracción. En esa época, además, los mineros comenzaron a sufrir graves enfermedades por el manejo de material radiactivo. Para extraer y llegar a suministrar las cantidades exigidas, la empresa extractora optó por servirse de presos de los campos de concentración como mano de obra.

LOS ISÓTOPOS DEL URANIO

El uranio que se encuentra en la naturaleza es una mezcla de dos isótopos: el uranio-235 y el uranio-238. El segundo es mucho más abundante, constituyendo el 99,2% del uranio natural, mientras que el resto corresponde al uranio-235. Y sin embargo, es este último el que resulta imprescindible para producir una reacción en cadena. Cuando el uranio-238 absorbe un neutrón, en lugar de fisionarse produce una desintegración beta y se transmuta en plutonio-239. El uranio-235, por el contrario, se fisiona fácilmente y con neutrones dentro un cierto rango de energías —cinéticas—. Cuando la fuente consiste en una mezcla de ambos isótopos, con un gran porcentaje de uranio-238, este absorbe una gran parte de los neutrones, de modo que imposibilita que tenga lugar la reacción en cadena. Por tanto, para que se produzca una reacción en cadena sostenible es necesario usar una mezcla con el mayor porcentaje de uranio-235 posible, lo que se denomina uranio enriquecido. El proceso del enriquecimiento del uranio consiste en purificar la mezcla para incrementar la presencia de uranio-235. Se considera que para fabricar una bomba atómica se debe lograr que el 90% del uranio sea de este isótopo. No es fácil separar ambos isótopos y, de hecho, los científicos alemanes no lograron desarrollar un método suficientemente bueno como para obtener uranio enriquecido, lo que a la postre supuso que acabaran fracasando. En el Proyecto Manhattan, por el contrario, se logró el enriquecimiento del uranio en la planta de Oak Ridge (Tennessee), haciendo que la construcción de la primera bomba atómica llegara a ser una realidad.



Sala de paneles de control de la planta de Oak Ridge, fundamental en el desarrollo del Proyecto Manhattan.

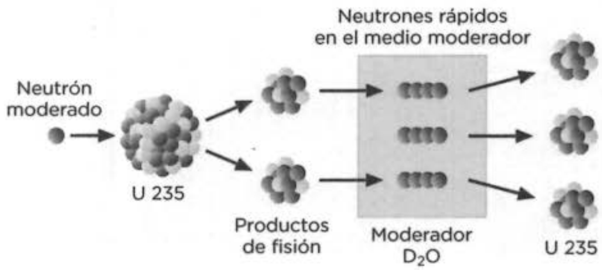
Aunque Otto Hahn no se involucró en el desarrollo de la bomba, sí que llegó a determinar que para la reacción en cadena era necesario usar uranio-235, que era mucho más difícil de conseguir que el isótopo uranio-238.

Otra de las cuestiones técnicas para crear la bomba era disponer de una sustancia que ralentizara los neutrones. Tal como ya habían descubierto Fermi y Meitner, los neutrones lentos provocan la fisión con mayor eficiencia. Cuando los neutrones inciden con cierta velocidad —baja energía cinética—, es mucho más probable que sean absorbidos por el núcleo, lo que aumenta la probabilidad de provocar un proceso de fisión (figura 2). Se probó con distintas sustancias para el frenado de neutrones hasta que determinaron que la más adecuada era el agua pesada. El agua pesada se diferencia del agua común en que el hidrógeno de sus moléculas es un isótopo llamado «deuterio», que además del protón, tiene un neutrón adicional en su núcleo.

Ya en 1941, Heisenberg fue capaz de idear un contenedor de uranio y agua pesada para intentar producir una reacción en cadena. No tuvo éxito en principio por haber subestimado la importancia de conocer el valor sobre la masa crítica de uranio necesaria para la reacción en cadena. Tras repetir el experimento en varias ocasiones, a principios de 1942 pudo corroborar que se había iniciado una reacción en cadena. Aunque no era una reacción en cadena sostenida, logró detectar que se había producido un efecto multiplicativo en la fisión inducida. De nuevo, un error en la disposición del uranio, en láminas en lugar de hacerlo como esferas, imposibilitó el funcionamiento deseado del reactor.

Los servicios secretos aliados desconocían las dificultades por las que atravesaba el proyecto alemán, por lo que trataron

FIG. 2



Para lograr una reacción en cadena sostenida, es necesario que los neutrones ralenticen su velocidad, que se consigue atravesando un medio moderador como es el agua pesada.

FARM HALL

Entre mayo y junio de 1945, las fuerzas aliadas detuvieron al conjunto de científicos alemanes que se habían implicado en el desarrollo de la bomba atómica. Los trasladaron a Farm Hall, una casa situada en el condado de Godmanchester, en las proximidades de Cambridge (Inglaterra), donde estuvieron encerrados medio año. En todas las habitaciones había micrófonos porque se quería aclarar el grado de implicación de cada uno de los científicos y hasta qué punto el programa alemán había llegado a desarrollar la bomba atómica. Werner Heisenberg, Otto Hahn, Carl Friedrich von Weizsäcker y Max von Laue formaron parte del grupo de diez científicos retenidos en la casa. No todos los recluidos habían tenido el mismo grado de participación. Otto Hahn, por ejemplo, apenas había aportado algo en ninguno de los proyectos e investigaciones que se habían llevado a cabo. En 1992 salieron a la luz pública las transcripciones de las conversaciones. Aunque no existen declaraciones determinantes, la información contenida en los registros vierte dudas y sombras sobre las decisiones y conductas de científicos como Heisenberg o Von Weizsäcker, y sobre las justificaciones que habían declarado en su defensa. De hecho, mientras estuvieron internados, les llegó la noticia de que Estados Unidos había lanzado sendas bombas atómicas sobre Hiroshima y Nagasaki. Esta noticia consternó a Hahn, quien aseguró que se sentía responsable por los muertos, mientras que Heisenberg dudó de la veracidad de la noticia y Von Weizsäcker dijo al respecto que «si hubiéramos querido que Alemania ganara la guerra, lo habríamos conseguido».



de sabotearlo. Incluso concibieron la posibilidad de asesinar a Heisenberg —y estuvieron a punto de hacerlo—, pero finalmente optaron por destruir la fábrica de agua pesada. Se trataba de una fábrica noruega situada en Vemork. Los británicos enviaron dos aviones para destruir la fábrica pero se estrellaron, de modo que seguidamente se preparó a un grupo de soldados noruegos refugiados en el Reino Unido, que logró introducirse en el edificio para hacerlo estallar por los aires.

Ya sea por los sabotajes o por la poca pericia mostrada por los científicos alemanes, lo cierto es que el ejército nazi no dispuso de la bomba atómica entre su arsenal bélico. Más tarde, Heisenberg y otros científicos alemanes llegaron a argumentar que habían saboteado voluntariamente el programa nuclear alemán desde dentro para evitar que su país dispusiera de ese tipo de armamento. Sin embargo, muchos historiadores creen que sobre todo al principio del conflicto, la mayor parte de ellos tenía la clara intención de desarrollar la bomba atómica.

EL PROYECTO MANHATTAN

En el Reino Unido, Otto Frisch y Rudolph Peierls escribieron en 1940 un memorándum en el que explicaban cuáles tenían que ser las características de una bomba atómica. En el memorándum Frisch-Peierls, determinaron que una reacción en cadena basada en uranio-235 no requería de una gran cantidad de este material radiactivo. Lograron determinar la masa crítica, un dato que los alemanes no habían podido concretar. Para evitar que durante la propia manipulación la bomba explotase, determinaron como medida de seguridad que el contenido se almacenase dividido en dos porciones. Solo al unirlas se reuniría la masa crítica necesaria para que la bomba detonara según una reacción en cadena sostenida. Esta información de nuevo se remitió a Estados Unidos, donde seguían sin parecer mostrar ningún especial interés en su desarrollo.

Todo cambió en diciembre de 1941 con el ataque a Pearl Harbor, que desencadenó la entrada definitiva de Estados Unidos en

el conflicto. En ese mismo mes, el comité MAUD se reunió con científicos estadounidenses para aclararles su programa. Con la entrada en guerra del país, se aceleró el que se vendría a llamar Proyecto Manhattan.

«Por el momento, creo que la guerra se acabará mucho antes de que se construya la primera bomba atómica.»

— WERNER HEISENBERG, EN UN INFORME SOBRE LAS POSIBILIDADES DE ELABORAR LA BOMBA ATÓMICA.

En esos tiempos cruciales se descubrió el plutonio, un elemento que resultó ser un material mejor que el uranio para fabricar una bomba. Este elemento ocupa la posición 94 en la tabla periódica y Fermi creía haberlo hallado en 1934, cuando bombardeó uranio con neutrones. Llamó a esta nueva sustancia «hesperio», pero como determinaron Hahn y Meitner, Fermi no había encontrado un elemento transuránico, sino que sin darse cuenta había provocado la fisión del uranio. Entre 1940 y 1941, en la Universidad de California se realizaron una serie de experimentos en un ciclotrón, en los que se bombardeaba uranio con deuterio. En ese momento se produjo el isótopo plutonio-239, que se reveló como un elemento especialmente adecuado para desencadenar procesos de fisión nuclear, y por tanto como material para hacer la bomba atómica. Aunque la intención de los científicos era publicar los resultados en alguna revista científica, el Gobierno decidió prohibir que esta información sobre el material viera la luz.

El Proyecto Manhattan, finalmente, se puso en marcha el 13 de agosto de 1942 bajo la dirección del militar Leslie Groves. En noviembre se dispuso que las investigaciones se realizarían en Los Álamos, una instalación secreta situada en Nuevo México. Este centro lo dirigiría el físico Robert Oppenheimer y acogería a los mejores científicos de la época como Fermi, Frisch, Bohr, Lawrence o Feynman. También se invitó a Meitner, pero esta, por sus convicciones personales, declinó la oferta.

Ahora solo faltaba demostrar que una reacción en cadena podía sostenerse. Enrico Fermi lo consiguió en una pista de *squash* que se encontraba en el sótano de un estadio de Chicago.

«LITTLE BOY» Y «FAT MAN»



La bomba «Little Boy» en la isla Tinian, antes de ser cargada en el *Enola Gay*.

El *Enola Gay*, un bombardero B-29 de las tropas norteamericanas, fue el avión desde el que se lanzó la primera bomba atómica, en concreto sobre Hiroshima el 6 de agosto de 1945. La nave contaba con doce tripulantes, y el piloto y comandante era el coronel Paul Tibbets. La misión partió de la isla de Tinian, en el Pacífico. Los componentes de la bomba se habían enviado hasta allí, donde se habían ensamblado para que estuviera lista para su uso. El avión salió de la base en solitario y cuando sobrevoló la isla de Iwo Jima —que había sido conquistada por Estados Unidos poco antes— se le unieron otros dos bombarderos, que lo escoltaron hasta llegar a Hiroshima. Dentro del *Enola Gay* se iniciaron los preparativos para lanzar la bomba, hasta que finalmente se apretó el botón para abrir las compuertas. La bomba, que se bautizó como «Little Boy», tardó menos de un minuto en explotar a unos 600 metros del suelo. Si explotaba antes, gran parte de la energía se iba a disipar en el aire; si lo hacía más tarde, la energía se gastaría en producir un enorme cráter. Una mayor capacidad de destrucción en cuanto a vidas humanas se encontraba en esa justa distancia. Se causaron 140 000 muertos. Uno de los tripulantes aseguró:

> Allí donde habíamos visto una ciudad pocos minutos antes, ahora ya no podíamos verla.

Tres días después, el 9 de agosto, «Fat Man», la bomba de plutonio-239, cayó sobre Nagasaki. Esta vez fue el *Bockscar*, de nuevo un bombardero B-29, el que transportaría la bomba y a la tripulación sobre el objetivo. Resultado del ataque, fallecieron 40 000 personas. Japón firmó la rendición y se puso fin a la Segunda Guerra Mundial.

Se trataba de un éxito extraordinario. Estados Unidos se había incorporado tarde en la carrera para producir la bomba, pero rápidamente había conseguido los elementos indispensables para que fuera una realidad.

«Nosotros supimos que el mundo ya no sería el mismo.»

— Robert Oppenheimer, después de fabricar la primera bomba atómica.

En 1942 se construyeron varias plantas para producir plutonio-239. Fueron necesarios una gran infinidad de cálculos —como el referido a la difusión de neutrones— antes de poder llevar a cabo la primera prueba nuclear. Aunque en dicha prueba se usó plutonio, finalmente se decidió que la primera bomba atómica que se arrojaría sobre Hiroshima sería de uranio-235. En cambio, en la bomba de Nagasaki se empleó plutonio-239.

LA HUIDA DE MEITNER

Al tiempo que el mundo parecía abocado a la destrucción, Meitner vivía su propio infierno personal. Todo se precipitó desde el momento en que se produjo la anexión de Austria y Alemania el 12 de marzo de 1938. Automáticamente, se convirtió en ciudadana alemana, y por tanto las leyes alemanas de naturaleza discriminatoria en relación a los habitantes de origen judío pasaron a afectarla. En Viena, mientas tanto, la anexión se celebró con festejos.

Bohr se implicó de forma muy decidida en ayudar a Meitner a encontrar trabajo en otro país. Se barajaron distintas opciones, como por ejemplo que Meitner trabajara en Copenhague en el instituto de física con el propio Bohr, y donde podría estar junto a su sobrino Otto Robert Frisch. Se arregló todo para dar ese paso, pero surgió una dificultad aparentemente insalvable: los pasaportes habían dejado de tener validez y las autoridades alemanas no tenían ninguna intención de apresurarse para facilitarle otro.



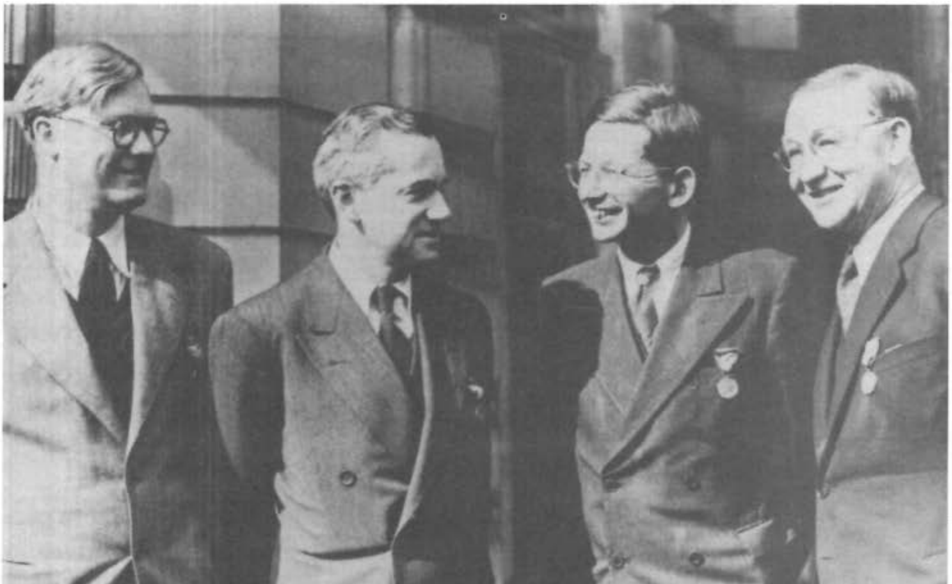


FOTO SUPERIOR:
Otto Hahn y Lise Meitner en la ceremonia de apertura del Instituto Hahn-Meitner para la Investigación Nuclear, en Berlín, el 14 de marzo de 1959.

FOTO INFERIOR:
Los miembros de la misión británica del Proyecto Manhattan en la década de 1940. De izquierda a derecha: William G. Penney, Otto Frisch, Rudolf Peierls y John Cockcroft.

En cualquier caso, a instancias de Bohr, se plantearon dos nuevos planes para Meitner. Por un lado, existía la posibilidad de que trabajara en la Universidad de Gröningen (Holanda). Por otro, en Estocolmo, el físico Manne Siegbahn, con quien Meitner había contactado décadas atrás, estaba construyendo un instituto de investigación de física, y existía la posibilidad de que hubiera una plaza para ella. En Gröningen, la universidad no disponía de dinero para pagarle un salario, de modo que Bohr convenció a dos físicos —Dirk Coster y Adriaan Fokker— para que hicieran una campaña para recaudar el dinero necesario.

En el Instituto Kaiser Wilhelm la situación era cada vez más tensa. Hahn recibía numerosas presiones para que expulsara a Meitner del centro, cuya presencia era improrrogable. Según recordó posteriormente Hahn:

> La situación se tornó cada vez más insostenible [...]. Lise estaba muy enfadada conmigo [...]. Por otro lado, continuamente se me decía que debía abandonar su posición desde hacía tiempo, y que ella misma tendría que darse cuenta de que estaba poniendo en peligro al propio instituto.

Meitner contaba con amigos, que trataron de mediar frente a las autoridades. El químico e ingeniero alemán Carl Bosch (1874-1940), por ejemplo, solicitó al ministro de Educación que permitiera «a la famosa científica Lise Meitner escapar a un país extranjero neutral: Suecia, Dinamarca o Suiza». La respuesta del ministerio fue concluyente:

> [...] se considera indeseable que renombrados judíos deban abandonar Alemania para ir al extranjero y actuar en contra de los intereses alemanes.

Sin embargo, dejaba abierta la posibilidad de que pudiera permanecer en su puesto de trabajo. Mientras tanto, Meitner decidió abandonar su piso junto al instituto para ir a vivir a un hotel. En junio de 1938 la persecución contra los judíos se intensificó, y se estaba preparando una ordenanza que iba a prohibirles, por ejem-

plo, que pudieran comerciar. Entre los amigos de Meitner saltaron las alarmas. Su vida parecía estar en peligro y tenían que lograr que huyera del país.

EL PLAN

Nadie podía saber que se estaba elaborando un plan para que Meitner pudiera escapar. Para intercambiar información con el exterior, se optó por aprovechar el viaje de colegas científicos para ejercer de mensajeros. Meitner, que en aquellos momentos tenía sobre la mesa dos posibles alternativas, quería decantarse por la opción sueca, ya que creía que era donde podría ser más útil. Sin embargo, no había ninguna manera de organizar el desplazamiento para llegar al país. El 12 de julio, Hahn se puso en contacto con Meitner para explicarle que su destino sería Holanda en lugar de Suecia. Se tenía que ir a la mañana siguiente. Sin que ella supiera nada, sus amigos lo habían organizado todo para que viajara a Gröningen.

Todo se había precipitado porque se sabía que, tarde o temprano, en las fronteras alemanas se iban a aplicar criterios más estrictos. En ese momento, la frontera holandesa era la que ofrecía mayor posibilidad de ser traspasada. Era necesario apresurarse y llevarlo a cabo con la máxima discreción. La intervención de Dirk Coster resultó, en este aspecto, crucial. En la frontera holandesa, Coster convenció a los soldados para que dejaran cruzar a Meitner. Tuvo que enseñarles el permiso oficial de entrada que se había expedido en Holanda y también les pidió que persuadieran a los soldados alemanes para que no pusieran trabas. Meitner seguía sin disponer de visado, por lo que todo dependía del éxito de esta gestión.

Posteriormente, Coster se dirigió a Berlín para ir en busca de la física. Meitner tenía las instrucciones de no actuar de manera sospechosa bajo ningún concepto, de modo que trabajó como lo haría un día cualquiera. Al acabar su jornada, a las ocho de la tarde, se dirigió al hotel y preparó dos reducidas maletas como si fuera a realizar una pequeña excursión. No dio ninguna indicación en el

hotel de que no pensaba regresar. Su equipaje era mínimo, para no despertar sospechas. Poco más tarde se encontraría con Coster.

Nadie podía adivinar sus planes de huida y no era la ocasión para celebrar despedidas. Era como si las tres décadas viviendo en Berlín se desvanecieran, como si nunca hubieran tenido lugar. Contó siempre con el apoyo de Hahn, que llegó a darle un anillo perteneciente a su madre, por si surgía alguna «emergencia urgente» que le permitiera, por ejemplo, sobornar a los soldados fronterizos. Aparte de esto, apenas disponía de unos pocos marcos alemanes. Hahn recordó esos intensos momentos de la siguiente manera:

> Con miedo y temblando nos preguntamos si lo conseguiría o no. Acordamos una palabra clave con la que nos informaría por telegrama sobre el éxito o el fracaso del viaje. Lise Meitner estaba especialmente expuesta a los peligros de los continuos controles de las SS en los trenes que iban al extranjero. Cada dos por tres, se arrestaba a gente que intentaba llegar al extranjero por tren y se los traían de vuelta.

Mientras tanto, uno de los científicos del Instituto Kaiser Wilhelm simpatizante con el nazismo tuvo noticias de los planes de huida de Meitner. Tras cursar la correspondiente denuncia, las autoridades alemanas se dispusieron a investigarlo. Por suerte, cuando reaccionaron al aviso, ella ya había logrado salir del país.

El viaje en tren hasta la frontera holandesa duró siete interminables horas. Era consciente de que los planes se podían desbaratar en cualquier momento, tal como sabía que había ocurrido en muchos otros casos. Sin embargo, una vez en la frontera, todo salió según lo establecido por Coster, que al final del viaje pudo enviar un telegrama a Hahn explicando que el «bebé» había llegado sano y salvo.

EN EL INSTITUTO MANNE SIEGBAHN

Tras algunas semanas en la apacible ciudad de Gröningen —que contrastaba con el constante despliegue militar que sufría Ber-

lín—, Meitner decidió dirigirse a Estocolmo y retomar así su plan inicial. Irse de Holanda acabó demostrándose que fue una decisión correcta, visto que Alemania invadió Holanda y Bélgica el 10 de mayo de 1940. De haber permanecido allí, difícilmente hubiera conseguido volver a escapar.

Meitner aprovechó para visitar a Bohr y en agosto de 1938 llegó a Suecia. En primer lugar quiso reencontrarse con su vieja amiga Eva von Bahr-Bergius en Kungälv. Tras darle cuenta de la difícil situación en la que se encontraba y de sus dificultades económicas, Eva le recomendó que tramitara oficialmente su salida del Instituto Kaiser Wilhelm y así solicitara a continuación la pensión que le correspondía.

En Suecia se le planteó el reto de empezar una nueva vida, en cierto modo desde cero. Para su sorpresa, tampoco pudo contar con la ayuda de Manne Siegbahn, que estaba más ocupado en los pormenores de poner en funcionamiento el instituto que en ofrecerle un puesto digno y unos medios adecuados para su supervivencia. Para Meitner, eso significó que disponía de un laboratorio apenas equipado y sin ayudantes, y se le ofreció el salario más bajo, como si no fuera más que una asistente. Por los treinta años trabajando en Alemania tampoco se le concedió pensión alguna. Con el idioma como barrera, volvía a sentirse en una situación de desamparo.

En su frecuente correspondencia con Hahn, le exponía su dramática situación:

> No he hecho nada malo; ¿por qué de repente han de tratarme como persona non grata, o peor, alguien a la que se entierra viva? [...] Si lo piensas, no puede ser difícil que entiendas lo que significa no disponer de un equipo científico. Para mí, esto es lo más difícil que puede haber. Pero no estoy realmente amargada, es solo que no veo un propósito real en mi vida en este momento, y me siento muy sola.

El 5 de diciembre de 1938, Meitner confesó a Hahn:

> A menudo me siento como un títere en tensión, que hace ciertas cosas, sonríe amistosamente, y carece de una vida real.

Sin lugar a dudas, las cartas que Meitner intercambió con Otto Hahn reflejaban un intenso dolor y malestar. Mientras se sucedía este intercambio postal, en noviembre de 1938 Meitner y Hahn tuvieron ocasión de reunirse de nuevo en el instituto de Bohr en Copenhague. Otto Robert Frisch y el propio Bohr participaron en el encuentro. El tema central de la discusión giró en torno a los elementos transuránicos y los experimentos que se estaban realizando en el Instituto Kaiser Wilhelm. En esta reunión se decidió realizar el experimento decisivo que condujo a comprender la fisión nuclear.

La situación que se vivía en Alemania siguió afectando a Meitner directamente. El 9 de noviembre de 1938 ha pasado a la historia como la «Noche de los cristales rotos», en la que se sucedieron múltiples ataques y linchamientos multitudinarios contra judíos y sus propiedades. Fueron organizados por Joseph Goebbels y se utilizó a las SA (Sturmabteilung, o tropas de asalto) y a las juventudes hitlerianas, entre otras organizaciones. Se quemaron sinagogas, se incendiaron tiendas, y miles de judíos fueron aprisionados y conducidos a campos de concentración. Entre ellos se encontraba Justinian Frisch, el padre de Otto Robert Frisch, quien tras su arresto fue enviado al campo de concentración de Dachau.

Meitner no podía haber recibido una noticia peor. Era Navidad, y en su soledad de nuevo recibía con esta noticia otro golpe terrible. Otra vez buscó el apoyo de Eva von Bahr-Bergius, y seguidamente se les uniría Otto Robert Frisch. En una situación terrible tanto en lo personal como en lo familiar, y en un mundo que parecía ir directo a la destrucción, tuvo lugar el famoso paseo por la nieve en el que se concibió la idea de la fisión nuclear. A principios de año, recibió la feliz noticia de que su hermano Justinian había sido liberado y se trasladaría a vivir también a Suecia con su familia.

Mientras tanto, Hahn intentó que Meitner recuperara el resto de sus pertenencias, las que habían permanecido en Berlín. Empaquetó los libros, el instrumental, la ropa y otros enseres, pero la exhaustiva revisión que la policía nazi realizó para aprobar el envío consistió en destruirlo absolutamente todo, incluidos los libros.

Hahn ejercía de director del Instituto Kaiser Wilhelm desde años atrás, pero seguían existiendo dudas sobre su compromiso

con la patria dados sus vínculos con científicos judíos tales como Meitner. En un inicio, Hahn también había participado en el comité fundado en 1939 para explorar las posibilidades de la fisión para la fabricación de la bomba atómica. Como reacción, y por un instinto de supervivencia, Hahn acabó por distanciarse de Meitner. Pero también fue más allá hasta autoconvencerse de que había sido de hecho el único protagonista del descubrimiento de la fisión.

> «No tengo aquí una posición que me permita hacer nada importante. Tratad de imaginar cómo os sentiríais si [...] solo tuvierais un despacho en una institución que no es vuestra, sin ninguna ayuda, sin derechos...»
>
> — Lise Meitner.

Para Meitner, la situación en Suecia era insostenible y no tenía visos de cambiar. Por este motivo, en 1939 tanteó la posibilidad de incorporarse al laboratorio Cavendish de Cambridge. Le ofrecieron un contrato que aceptó a condición de que pudiera trasladarse allí al año siguiente. Este retraso es una decisión que siempre lamentaría, dado que el estallido de la guerra con la invasión de Polonia por parte de Alemania impidió que pudiera trasladarse al Reino Unido.

Meitner regresó a su gris despacho en Suecia. En 1943 se la invitó a participar en el Proyecto Manhattan, pero lo rechazó de plano. No quería involucrarse en lo que se estaba gestando, a pesar de que hacerlo posiblemente hubiera significado un notable cambio en su vida.

UNA POPULARIDAD TARDÍA

En 1945, Alemania se rindió. Por la falta de comunicaciones, Meitner ignoraba lo que había ocurrido con muchos de sus amigos, aunque progresivamente fue recibiendo desagradables noticias, como la de que Hahn había sido apresado por las fuerzas aliadas y conducido a Farm Hall.

Cuando se lanzaron las bombas atómicas sobre Japón, para Meitner, como para tantos otros físicos que directa o indirectamente conocían las posibilidades que ofrecía la fisión nuclear, fue un momento chocante. Lo que menos se podía imaginar es que un reportero local quisiera entrevistarla, para conocer su grado de implicación en el desarrollo de la bomba atómica. Meitner tuvo que insistir en que ella no había tenido nada que ver, pero tres días más tarde ya era Eleonor Roosevelt la que solicitaba su participación en un programa de radio estadounidense, de modo que se iba a establecer una conexión transatlántica. De la noche a la mañana, Meitner se convirtió en una celebridad, como la mujer que había logrado escapar heroicamente de la Alemania nazi con los secretos de la fisión. Aunque siempre intentó explicar con claridad que su participación se había limitado al descubrimiento del concepto físico de la fisión nuclear, en el imaginario popular alcanzó el grado de estrella protagonista.

Fue principalmente en Estados Unidos donde su aura se empezó a hacer cada vez mayor. Muy pronto recibió una invitación para viajar a dicho país para impartir cursos y conferencias. Una vez allí, solicitaron su presencia en las principales universidades como Harvard y Princeton. El presidente Harry Truman la recibió, una organización feminista la nombró mujer del año, e incluso recibió una oferta de Hollywood para que supervisara una película inspirada en su vida, que rechazó de inmediato. Durante medio año estableció su residencia en Estados Unidos, recibiendo todo tipo de honores y reconocimientos. También en Suecia parecía que las cosas empezaban a cambiar cuando la Real Academia de las Ciencias de Suecia la nombró como uno de sus miembros. Sin embargo, se trató de una ilusión. Sus condiciones laborales y el trato que siguió recibiendo al regresar no variaron ni un ápice.

LA CONTROVERSIA POR EL NOBEL

Fue un momento agridulce porque precisamente en 1945 el jurado del Nobel se reunió de nuevo para establecer las candidaturas. El

EL INFORME SOBRE HAHN

Uno de los comandantes responsables de las grabaciones en Farm Hall realizó una serie de informes sobre los científicos que se encontraban allí, como Max von Laue, Werner Heisenberg o Carl Friedrich von Weizsäcker. Respecto a Otto Hahn, la valoración que escribió uno de los comandantes que supervisaba las grabaciones fue lo siguiente:

> Un hombre de mundo. Ha sido el que más amable se ha mostrado de los profesores. Impopular entre los miembros más jóvenes del grupo, que le consideran un déspota. Tiene un sentido del humor muy agudo y lleno de sentido común. Se muestra respetuoso hacia Inglaterra y Estados Unidos. Se ha sentido destrozado por el anuncio del uso de la bomba atómica y se considera responsable de las vidas de todas esas personas debido a su descubrimiento original. Se ha tomado muy bien el hecho de que la prensa atribuyera a la profesora Meitner el descubrimiento original, aunque puntualiza que de hecho ella era una de sus ayudantes y ya había salido de Berlín en la época en que él hizo su descubrimiento.

En este informe se constata cómo Hahn había reinterpretado los hechos en relación al proceso de descubrimiento de la fisión hasta el punto de considerar que Meitner no había tenido ninguna participación relevante. Las cartas y documentos que se conservan de la época, sin embargo, obligan a considerar que el papel de Meitner, al igual que el de Hahn, fue fundamental.

año anterior el premio se había suspendido, de modo que se iba a otorgar a los logros surgidos durante ambos años. El descubrimiento del proceso de la fisión merecía ser recompensado, y en el debate surgió la posibilidad de premiar tanto a Hahn como a Meitner. Aunque no hubo acuerdo unánime, finalmente Meitner quedó descartada. Sin duda, el hecho de que Meitner hubiera tenido que abandonar el instituto meses antes de que se realizara el descubrimiento de la fisión les hizo creer que su contribución no había sido relevante. Por otro lado, Hahn, que ya se había distanciado de Meitner, no dudó en razonar que su participación había sido irrelevante. Era una visión sesgada, dado que Meitner dirigió la investigación y había llamado la atención constantemente sobre los procesos que no se ajustaban a la teoría, y fue también la que había insistido en investigar el radio. Hahn consideró que Meitner

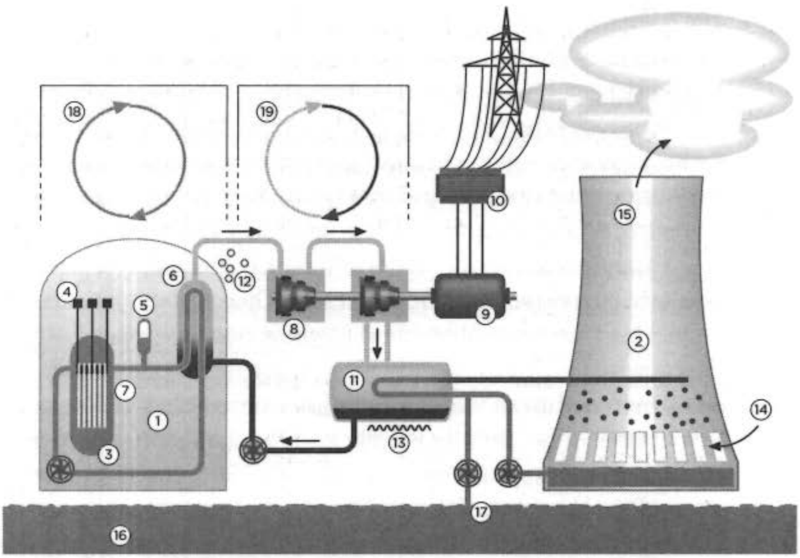
actuaba como una «amargada» al no alegrarse por su nominación. Para Meitner, se trató de una injusticia fundada en su raza y en su sexo. Además, consideraba que científicos como Hahn o Heisenberg habían colaborado más estrechamente con el régimen nazi de lo que más tarde reconocieron. Su amistad con Hahn se resintió para siempre, pero a pesar de esta amarga situación, asistió a la recepción del Nobel, y escuchó el discurso que pronunció Hahn, en el que en varias ocasiones citó su trabajo y el de Frisch.

ENERGÍA NUCLEAR

Tras la Segunda Guerra Mundial, aparecieron numerosas iniciativas que aspiraban a obtener rendimiento comercial de las tecnologías surgidas durante la guerra. Se depositaron numerosas esperanzas en la energía nuclear, y se creía que estaba llamada a inaugurar una nueva época. La primera planta nuclear que se conectó a la red eléctrica fue la de Obninsk, en la extinta URSS. Era un pequeño reactor experimental que se puso en funcionamiento en 1954. Dos años más tarde, Isabel II inauguró Calder Hall en el Reino Unido, que estuvo en funcionamiento hasta 2003. Era una central que usaba uranio no enriquecido y en un origen producía muy poca electricidad porque este uso enmascaraba el objetivo real, la producción de plutonio para uso militar. En nuestros días, las centrales suelen usar como combustible el uranio enriquecido —para generar una reacción en cadena sostenible con el fin de producir energía hay que purificarlo de manera que esta proporción llegue hasta el 3%—. El plutonio también puede aprovecharse como combustible nuclear, pero su uso resulta mucho más controvertido debido a la facilidad con que se puede convertir en armamento. En la actualidad, hay centrales nucleares en funcionamiento en 29 países, su número total no supera el medio millar y generan casi el 20% de la producción de electricidad mundial. En estas centrales, la energía generada por la reacción en cadena se usa para evaporar agua y mover unas turbinas, cuyo movimiento produce la electricidad. Posteriormente, el agua se hace pasar por un condensador de manera que se reutiliza en un nuevo ciclo. El uranio enriquecido se dispone en pastillas, que se apilan en el interior de unos tubos o varillas de 4 metros de longitud. Estas varillas se disponen en grupos de 50 o 100 unidades, y en un reactor se instalan aproximadamente unas 200 agrupaciones. Este combustible nuclear se coloca en un contenedor o vasija compuesta por materiales que permiten aislar o contener la radiactividad. Para controlar y moderar la reacción en cadena existen unas barras de control que sirven para absorber neutrones. De esta manera, se evita que se produzca una reacción hasta un grado de explosión.

Por su parte, Hahn tuvo la deferencia de compartir el dinero del premio con ella, que a su vez lo donó a un comité sobre energía atómica que se había creado en Princeton, y cuya misión consistía en supervisar las posibles aplicaciones de este tipo de energía.

Tras la guerra, la Sociedad Kaiser Wilhelm se convirtió en la Sociedad Max Planck. Hahn y Strassmann participaron activamente en la reconstrucción de la red de instituciones científicas. En 1947, Strassmann y Hahn se pusieron de nuevo en contacto



En las centrales nucleares, la energía de la fisión se emplea para evaporar agua, que se utiliza para mover unas turbinas y generar electricidad.

Central nuclear con un reactor de agua presurizado: 1) bloque del reactor; 2) torre de refrigeración; 3) reactor; 4) barras de control; 5) medidor de presión; 6) generador de vapor; 7) combustible; 8) turbina; 9) generador; 10) transformador; 11) condensador; 12) partículas de gas; 13) agua; 14) aire; 15) aire (húmedo); 16) curso de agua; 17) circuito de refrigeración; 18) circuito primario; 19) circuito secundario.

con Meitner para hacerle un importante ofrecimiento: recuperar su antigua posición. Para Meitner, sin embargo, el regreso era impensable. En la carta de respuesta a Strassmann, Meitner explicaba que no estaba capacitada para olvidar los horribles sucesos ocurridos durante la época de Hitler, y consideraba que existirían diferencias irreconciliables entre ella y el resto de colegas alemanes. También contestó a Hahn, explicándole que sus escrúpulos morales le impedían volver.

A pesar de su desconfianza, regresó a Alemania en 1949 para recoger la medalla Max Planck por su trabajo relacionado con la fisión. Fue un premio compartido con Hahn y Strassmann, y el mayor honor que podía recibir un científico en Alemania. También pudo poner fin a su fracasada estancia en el instituto sueco en 1947, cuando fue contratada por el Instituto Real de Tecnología de Suecia, y se dispuso todo para que disfrutara de su propio laboratorio, ayudantes e instrumental en condiciones. Por fin podría proseguir su labor científica, interrumpida durante años. A pesar de su avanzada edad, colaboró activamente en la construcción del primer reactor nuclear que albergaría Suecia. Finalmente, en 1953 se retiró, a la avanzada edad de setenta y cinco años.

Cuando a finales de la década de 1950 su salud se deterioró, se trasladó a vivir a Cambridge junto a Otto Robert Frisch. Procuró seguir muy activa y pronunció algunas conferencias, entre las que destaca una en Viena, donde hizo un repaso a toda su vida. En 1964 se atrevió incluso a viajar a Estados Unidos para visitar por última vez a parte de su familia y a sus amigos. La fisión aún le depararía un último reconocimiento cuando, en 1966, fue la primera mujer en recibir el premio Enrico Fermi, compartido nuevamente con Hahn y Strassmann. Hahn y su mujer fallecieron en el verano de 1968 y en octubre de ese mismo año lo haría Meitner. Frisch se ocupó de todos los detalles para que fuera enterrada en Inglaterra, e incluso escogió la frase inscrita en su lápida: «Una física que nunca perdió su humanidad».

Lecturas recomendadas

ACZEL, A., *Las guerras del uranio*, Barcelona, RBA, 2012.

BODANIS, D., *$E=mc^2$*, Barcelona, Planeta, 2002.

FRISCH, O.R., *De la fisión del átomo a la bomba de hidrógeno – Recuerdos de un físico nuclear*, Madrid, Alianza, 1982.

GAMOW, G., *Biografía de la física*, Madrid, Alianza, 2007.

GRIBBIN, J., *Historia de la ciencia, 1543-2001*, Barcelona, Crítica, 2003.

HOOFT, G., *Partículas elementales*, Barcelona, Drakontos, 2008.

KRAGH, H.S., *Generaciones cuánticas: una historia de la física en el siglo* XX, Madrid, Akal, 2007.

RIFE, P., *Lise Meitner and the dawn of the nuclear age*, Boston, Brikhäuser, 2007.

SÁNCHEZ RON, J.M., *Historia de la física cuántica*, Barcelona, Crítica, 2001.

SIME, R.L., *Lise Meitner. A life in physics*, California, University of California Press, 1996.

TERESI D. Y LEDERMAN L., *La partícula divina*, Barcelona, Drakontos, 2007.

Índice